轮机工程手册

上

人民交通出版社

轮机工程手册

上　册

《轮机工程手册》编委会

人民交通出版社

（京）新登字 091 号

内 容 提 要

本手册分上、中、下三册，主要内容如下。

上册——绪论；第 1 卷轮机工程基础：理论基础、技术基础、管理基础；第 2 卷燃料、润滑油、涂料及水：石油的基本知识、燃料、船用润滑剂、涂料、船舶水处理；第 3 卷金属与非金属材料：金属材料、非金属材料。

中册——第 4 卷船舶动力机械：船舶柴油机、船舶锅炉、船舶汽轮机及其装置、船舶燃气轮机装置、核动力、船舶联合动力装置；第 5 卷船舶辅助机械：船用泵、空气压送机械、船用换热器、海水淡化装置、船舶制冷装置、碟式分离机、液压传动、操舵装置、锚机和绞缆机、船舶起重设备、船舶减摇和侧推装置。

下册——第 6 卷船舶动力装置：船舶柴油机动力装置与系统、轴系与传动设备、船舶机械与设备的振动噪声控制；第 7 卷船舶系统：通用附件、供水系统、船舶压载、油污水和舱底水系统、船舶生活污水和垃圾处理系统、船舶通风、空气调节和加热系统、船舶消防系统、油船专用系统、散装运输危险化学品和液化气体船舶的专用系统；第 8 卷船舶电气：船舶电气元件、计算机基础、船舶电气系统、船舶电工材料、船舶电气检验与安全；第 9 卷机舱自动化：机舱自动化概论和规范、自动化仪表及控制器件、机舱自动控制系统、柴油机遥控操纵系统、集中监视系统。

轮 机 工 程 手 册
Lunji Gongcheng Shouce
上 册
《轮机工程手册》编委会
人民交通出版社出版发行
（100013 北京和平里东街 10 号）
各 地 新 华 书 店 经 销
人民交通出版社印刷厂印刷
开本：787×1092 1/10 印张：101.5 插页：8 字数：2598 千
1992 年 11 月 第 1 版
1992 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷
印数：3500 册 定价（上、中、下三册）：250.00 元 上册 定价：84.00 元
ISBN7-114-00361-7
U·00289

PARAMINS®

是埃克森化工
EXXON CHEMICAL
添加劑部門的商標

- Paramins添加劑調配的船用柴油機潤滑油已被世界各大船隊廣泛使用
- Paramins在中國遠洋運輸公司(COSCO)的船隻做了超過10,000小時的行船試驗
- Paramins以豐富的經驗,先進的技術與品質優異的產品,竭誠爲中國船隊服務



EXXON CHEMICAL

Performance Products Group

香港辦事處： 埃克森化工國際商務有限公司
香港灣仔港灣道8號瑞安中心33樓
G.P.O Box 9811
電話：(852) 862 0888
電傳：74618 ECAP HX

北京聯絡處： 中國北京市東長安大街
北京飯店1009套間
電話：5137766轉1009
電傳：210189 ECCI CN

ALFA-LAVAL

公司介绍

阿法－拉伐（香港）有限公司是阿法－拉伐集团的一部份。其总部在瑞典的斯德哥尔摩。

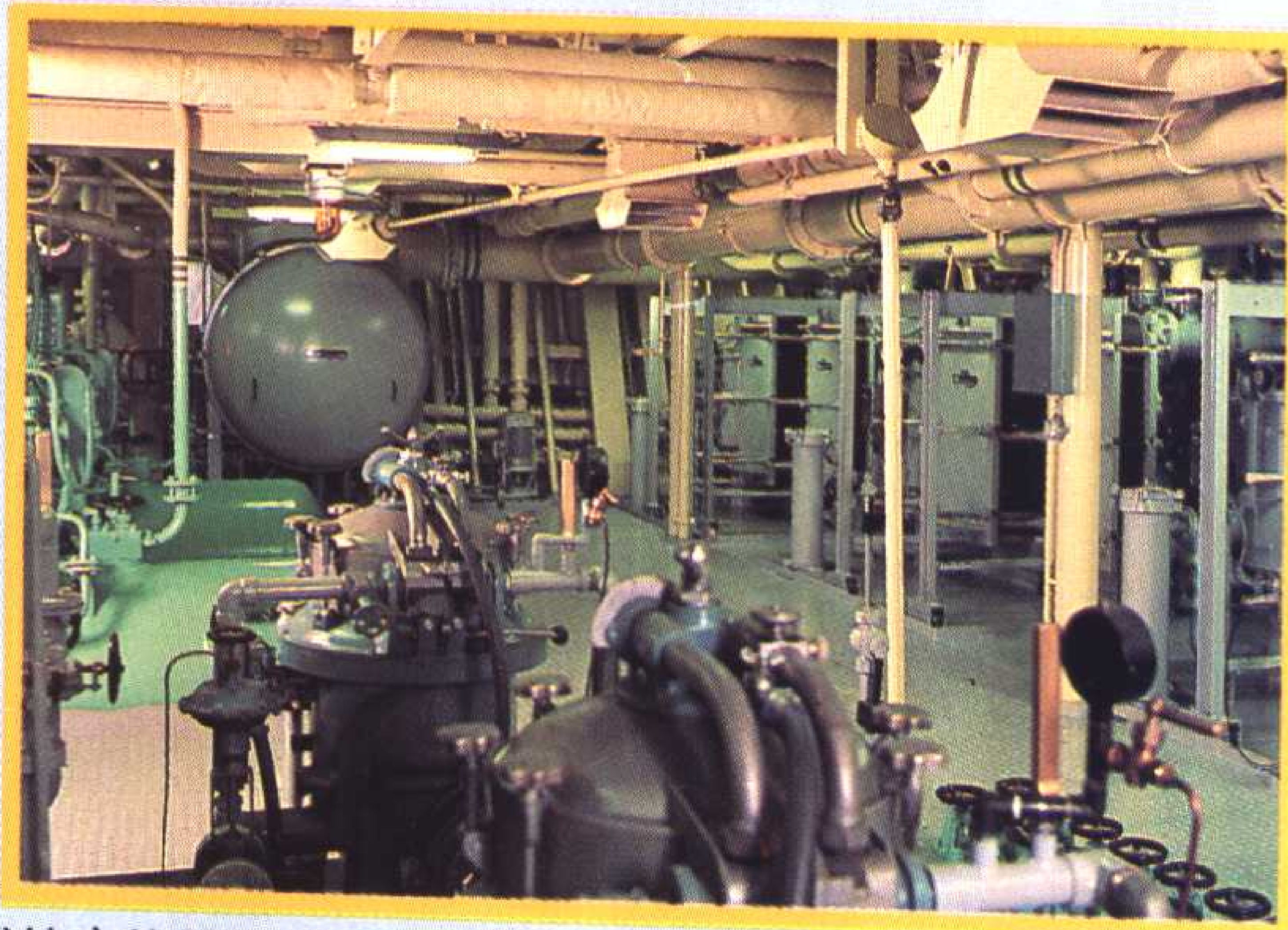
阿法－拉伐在1883年成立。最早期的发明是名为 Gustav de Laval 的'连续运转奶油分离机'。

分离机的生产支配了多年后，跟着是乳品和热交换器的推出。其后更在其他方面发展：流体技术，自动化，生产线和各方面全套的生产系统。

阿法－拉伐集团活跃于世界上130多国。它包括超过160间公司，45个生产单位，雇用超过16,000人，生意额达11,320.5百万瑞典克朗（1987）。

阿法－拉伐在船舶及动力工业





这瑞典的破冰船 Ymer 号是装有阿法－拉伐的分油机，板式热交换器和淡水蒸馏装置。

离心式分离机是现今船上标准的燃油和滑油清洁系统。

最新的燃油清洁系统能处理'比重'更重，更粘的燃油。

整个系统的概念是由阿法－拉伐构思而成。

这概念包括设计和供给燃油在射进柴油机汽缸前的清洁系统加上燃油处理或升压系统等。

其他阿法－拉伐的船上用品包括冷却用的板式热交换器，利用冷却水废热的淡水蒸馏装置等。

阿法－拉伐在船舶工业的成功秘诀是好的服务。

阿法－拉伐的产品能达到国际船务上的要求是通过阿法－拉伐发展组的先进工程技术和在全球各大港口里超过70多个服务站的服务。

ALFA-LAVAL

瑞典阿法－拉伐(香港)有限公司
香港办事处：
香港跑马地爱群道32号爱群商业大厦701室
邮政信箱：香港摩利臣山邮局47112号邮箱
电话：5-8339939　电传：74174 ALHK HX
电挂：ALFALAVAL　传真：5-8345183

瑞典阿法－拉伐(中国)有限公司
北京办事处：
北京民族饭店2248套间
电话：6014466（接内线2248）
电传：22827 ALBJ CN
电挂：ALFALAVAL BEIJING

瑞典阿法－拉伐(中国)有限公司
上海办事处：
上海茂名南路58号
锦江俱乐部58561室第4座
电话：582582（接内线58561）
电传：33440 ALSH CN

瑞典阿法－拉伐(中国)有限公司
广州办事处：
广州流花路东方宾馆2678室
电话：669900（接内线2678）
电传：44439 GZDFH 房间2678
传真：662775房间2678

船舶潤滑油—船舶輪機的命脉

在現代的柴油機船舶上，有效的氣缸潤滑對於完美的主機運作極爲重要，柴油機氣缸潤滑始終是發展低速船用柴油機的重要考慮因素。

1973年的石油危機導致燃油價格大幅上升，從而推動過去十多年來的低速柴油機製造廠對設計及機型不斷改良，以減低使用者在燃油費用上的重擔。

比耗油量（S.F.C.)是衡量柴油機性能的唯一指標，也決定了機組的操作成本。雖然製造廠更改了主要設計條件成功地降低比耗油量，但同時也更增加了氣缸油工作條件的嚴峻性，使氣缸油在大功率低速柴油機中扮演更重要的角色——工作的命脉。

作爲一家主要的潤滑研製廠，BP MAPINE認爲要達致有效的氣缸潤滑，氣缸油必須具備下列的性能指標：

1. 安全，油料必須十分安全，對人體健康衛生沒有任何危險，可供船上人員安全使用。
2. 化學成份穩定，在貯油櫃，供油管道及缸套內的注油管內不會產生沉澱物。
3. 高流動性，在正常貯存環境及操作溫度下能用泵浦輸送。
4. 熱穩定性及抗氧化穩定性高，以減少油質變化及焦化。
5. 分布性強，使油膜能於短時間內完全形成附於缸壁及活塞環的工作表面上。
6. 抗磨性強。
7. 油膜強度高及負載能力強，防止缸壁及活塞環在嚴峻的工作條件下發生拉缸現象。
8. 抗酸性高，減少腐蝕及磨耗。
9. 高清潔性及分散性，保持活塞環、環槽、掃氣通道及掃氣口的清潔，使拆檢周期得以延長。

BP MARINE的ENERGOL CLO-50M氣缸油是使用極高品質的基礎油和經長期試驗後才採用的添加劑配方均衡調製而成，完全符合上述各項條件，特別適用於燒用高粘度，高硫低質重油的柴油機，提供高度的潤滑及保護性。

BP MARINE也能提供一係列特別調配的氣缸油，以適應船隻因變更航線而使用過高或過低硫份的燃油時能彈性的對氣缸油配套，適應不同的工作條件更能提高經濟效益。

BP MARINE的船用潤滑油不僅限於氣缸油，包括了多種船舶專用潤滑油及潤滑脂，這些產品都是經過長期發展並與世界各國輪機製造廠緊密配合研製而成。

BP的ENERGOL O-EM30是特別爲潤滑水冷活塞型柴油機曲軸軸承而調製，具有適量的總碱值以應付可能進入係統內的酸性物質，這產品提供以下性能：

1. 更強的清潔性及分散性，使曲軸箱更潔淨。
2. 抗氧化及防銹性能。
3. 超卓的水分離性。

O-EM30同時也可用於艉軸管油封係統及作爲一般潤滑用途。

另一係列ENERGOL DL—MP30係統油則簡化操作要求，除了提供給所有的十字頭低速柴油機曲軸箱使用外，更可供潤滑燒用含硫量低於百分之一（1%）柴油的中速筒狀活塞柴油機使用，它的性能超越了API—CD的水平。

ENERGOL DL—MP係列的主要性能如下：

1. 良好的清潔及分散性，使曲軸箱更清潔。
2. 極高的熱穩定性及抗氧化穩定性以提高活塞冷却能力。
3. 含碱值足以中和燃燒後產生的酸性物質。
4. 防銹性。
5. 適用於船上作多用途潤滑油使用。

對於燒用重油的中速柴油機，BPMARINE的ENERGOL IC-HF303／304係列滑油已素享盛譽，近期中速柴油機發展趨勢顯示，某些機型須使用較高碱值的滑油以達致較佳的保護性。ＢＰ公司已預期有這方面的要求而早已推出總碱值爲40的ENERGOL IC-HF404滑油，除了潤滑燒用重油的中速筒狀活塞柴油機外，IC-HF係列滑油也適用於大多數的中速機內的減速齒輪箱。它的特性如下：

1. 清潔性及分散性優良，提供極佳的曲軸箱、活塞、環槽清潔度和最少活塞積垢。
2. 極高的熱穩定性及抗氧化穩定性，延長滑油使用壽命。
3. 良好的水分離性而保持最少的添加劑損耗。
4. 具防銹性。
5. 充分的碱性儲備以中和燃燒後產生的酸性物質。
6. 係列中具有不同碱值的油品可供選用以適應不同的操作要求。

使用英國石油公司(BP)的船用潤滑油並不表示操作者不需要依照製造廠的換油過濾和分油處理的要求。但是，使用英國石油公司產製的船用潤滑油則可確信輪機能按製造廠所設計的條件運作，效果相得益彰。

英國石油公司關心機器，更關心人類，所以各種BP產製的船用潤滑油都經過嚴格的衛生安全檢查，以確保在正確使用過程中對人體安全無害。

英國石油公司的船用潤滑油在全世界各大港口均有供應，您如果需要進一步瞭解英國石油公司產製的優良產品，請與下列地址或英國石油公司各分公司聯絡：

英國石油有限公司
香港中環金鐘道95號
統一中心、35樓
電話總機：8620200
電傳：65674 BPOIL HX
電掛：BEPEBUNKER HX
傳眞：5294074


NO SMOKING
FEOSO AMBASSADOR 2



上海立新船廠

Shanghai Lixin Shipyard

上海浦東陸家嘴路621號
621 Lujiazui Road,
Pudong Shanghai P.R.China
電話：8841201
電報掛號：4072
電傳：33103 BOMTA CN
圖文傳眞：86－21－842262
廠長：劉萬潤



2205瓩（3000HP）全迴轉推進器港作拖輪。



正在修理的大型客輪。

船廠簡介：

上海立新船廠（原名鴻翔興船廠）創建於1924年，隸屬中國交通部，是以修船、造船爲主，兼營鑄造、鍍鉻及其他金屬構件製造等業務的綜合企業，上海立新船廠技術力量雄厚、管理先進、設備齊全、經驗豐富、質量可靠、確保船期，是國內大型修、造船專業廠家之一。

半個多世紀以來，我們修理的各類中、外船舶和承攬的海輪航次修理、搶修業務，由于快速優質，價格合理而享譽國內外。和日本國新瀉鐵工廠合作設計、建造的2205千瓦（3000HP）全回轉推進器港作拖輪已達到國際先進水平，深得船東的讚賞和信賴。

上海立新船廠竭誠爲國內外航運事業服務，歡迎光臨指教。

經營範圍：

＊設計和建造各種港作拖輪、船塢、駁船以及各類水上工作船。

＊承接國內外大、中、小各類客、貨、油輪的特檢、歲修以及其他中小項目的修理。

＊承接中、外船舶的電氣、輪機、船體、冷凍、空調設備和甲板機械等各種航次修理，海損搶修工程，船用備件的製造和勞務工程。

＊製造和加工各種金屬構件。

＊承接普通鑄鐵、球墨鑄鐵、合金鑄鐵、有色金屬等鑄造加工業務。

＊承接柴油機、液壓機、工程車輛及印刷、紡織、冶金等機械零件製造以及易磨損易腐蝕的大型精密機械零件的鍍鉻業務。

＊與日本國新瀉鐵工廠合作經營全回轉推進器港作拖輪上海維修業務。

＊與中國四川油泵油嘴調速器廠合作經營上海的維修業務。

大連海運學院 自動化研究室 微電腦開發公司

本室自1979年起招收碩士研究生，1988年起招收博士研究生。先後完成了國家重點、交通部、企業委托等科研項目近百項。重點推廣項目如下：

ＤＭＣ－500係列
鍋爐微機控製係統

- 榮獲國家科委、國家經委優秀機電新產品獎。
- 榮獲交通部科技成果二等獎。
- 被國家經委、國家計委優選爲七五期間70項重點新技術推廣項目之一。
- 已推廣應用到黑龍江、遼寧、吉林、河北、河南、江蘇、新疆、湖南、寧夏、山東、北京、天津等地。

1. 雙主機（包括一部份RAM、ROM）係統、一塊CPU板工作，另一塊隨時處於待命狀態、受到外界強干擾時，能無擾動的自動從工作的ＣＰＵ板轉換到待命的ＣＰＵ板，繼續進行控制。
2. 微機本身有自診斷功能，能檢查出那一塊印刷電路板工作不正常。查出後，只要把不正常板拔出，換上備用板即可。
3. 投運前全套微機在55℃的烘箱內工作８小時。
4. 熱電偶、熱電阻等可直接和微機相連。
5. 可以和ＤＤＺⅡ型或ＤＤＺⅢ型儀表相連。
6. 用專用鍵盤設定各種控制參數、報警上下限、修正測量値的零點和量程，十分方便。
7. 最多有64個模擬量輸入，Ａ／Ｄ轉換時間爲25μｓ，精度爲10位。
8. 最多有16個模擬量輸出。可輸出０～10Ｖ、０～10㎃ＤＣ或1～5Ｖ、４～20㎃ＤＣ信號。
9. 32個開關量輸入，32個開關量輸出。信號可爲接點、電壓或電流。
10. 流量計算有溫度、壓力修正。
11. 有工藝流程圖，圖中顯示各種重要參數，並定時更新。
12. 有報警打印、報警燈、報警喇叭。
13. 定時或隨時用中文打印報表。
14. 經多年研究，微機中有功能很強的控製軟件，容易生成，組態靈活。
15. 用EEPROM保存重要參數。電源掉電後，不會丟失原有的重要數據。
16. Ｉ／Ｏ通道全部采用光電隔離。
17. 自帶進口的專門爲計算機設計的開關式穩壓電源。
18. 全部芯片、ＣＲＴ、打印機均爲進口高檔產品。
19. 微機係統穩定可靠，平均無故障時間大於8000小時。
20. 操作和維修方便。不懂計算機的人員也能使用維護。
21. 鍋爐的水位、給煤、一次風、二次風、爐膛負壓、主蒸汽壓力、主蒸汽溫度和煙氣中的含氧量等全部自動控製。與人工相比，大大減輕了操作人員的勞動強度。
22. 130噸／時煤粉爐的節煤率爲3.6%，其餘的燃煤爐節煤率爲5～9%。投運後一年內即可收回微機的投資費用。

其他科研成果

除上述鍋爐微機控製係統以外，大連海運學院微電腦開發公司還開發了下列項目，並已在全國推廣使用。

1. ＤＭＣ－201型船用柴油機工況監測係統。
2. ＤＭＣ—204型便携式柴油機測量分析係統。

以上兩項，用微型計算機檢測、顯示、打印下列各項：氣缸壓力曲線，高壓油泵油管壓力曲線，最高壓力及產生時刻，發火角，平均指示壓力，指示功率，油管壓力升高率，開始噴油時刻和壓力，噴油過程延續時間，柴油機轉速，耗油率等等。

3. ＤＭＣ—502Ｄ電站事故參數高速採集係統。
4. ＤＭＣ—610型熱電站微機控製與管理係統。
5. ＤＭＣ—402型油罐群存貯計量監控係統。
6. 連續式（鋼錠）加熱爐微機控製係統，控製爐溫、燃料量、風量、煙氣含氧量等，與人工操作相比，每台爐每年節約60萬元左右。

研究室主要成員：

朱紹廬教授、傅光永、黃讀業、王立安、黃郁南、孟憲堯副教授。

序

我国第一部《轮机工程手册》出版了，这是航运界的一件大事，是轮机工程界的一项重大科技成果。它的出版，必将对我国航运事业的发展产生深远的影响。

撰编这部手册，旨在系统地概括和总结国内外轮机工程中各个主要领域的成熟的技术和经验，以供广大轮机工程技术人员和有关技术人员查考、学习使用。

《轮机工程手册》是一部综合性的技术工具书，着重介绍各专业的基础理论、常用计算公式、图表数据、国内外资料、关键问题和发展趋向。选材的原则是：机电结合，以机为主；海河结合，以海为主；军民结合，民用为主；大中小(船)并举，重点为现代化船舶。紧密围绕轮机工程技术人员在“管、用、养、修、检（验)”工作的实际需要来撰写的，力求达到先进性和实用性相结合。

这一部近1千万字的著作，从1985年起，人民交通出版社组织了上百位国内有造诣的专家、教授和各类工程师，经过五年的艰辛努力，终于全部完成。这是我国广大轮机工程技术人员几十年来的知识与经验的结晶，代表着我国轮机工程技术的水平，是轮机工程界具有历史意义的著作。

在本手册的撰写过程中，曾得到交通部等40余个参编单位和其它有关单位的大力支持，使本手册能顺利出版，在此谨向他们致以崇高的敬意！

向一切关心、支持与爱护本手册的社会各界人士表示衷心感谢！

《轮机工程手册》
编辑委员会

各卷主编、主审

各卷主要执笔、审稿人员

马毛茂 马兴田 马家骏 马家骥 马震英 王子义 王丰永 王天序
王汉生 王立安 王 肃 王建斌 王复德 王鼎惠 方 竹 方霖芝
牛求煌 牛宝耒 邓世琮 鲍毓俊 卢士勋 冯广勤 冯恩德 孙业文
孙照文 孙季宽 孙锡三 达良臣 史际昌 史和祥 叶洪馨 龙肇夏
朱伯骏 朱仰华 朱绍庐 朱隆新 朱 曙 刘元诚 刘宗德 刘学范
刘荣钧 刘守善 刘 超 刘惠枝 刘 琴 刘道俊 李玉瑜 李长汉
李国卿 李绍忱 李滋湘 许运秀 任知先 吕登有 曲昭惠 邢宗浩
阮锦江 陆让之 陆 信 陆祥润 陆瑞松 陈玉霖 陈世明 陈义亮
陈民扬 陈崇铨 陈文凯 陈雁荡 陈兆中 陈明昭 陈鸿璆 陈震霖
吴 恒 吴宗晁 吴甲斌 吴昭钿 吴奕亮 吴绵翔 孟宪法 孟庆明
孟浩波 孟繁炯 孟宪尧 汪育才 汪仲山 汪荣海 余珩亭 沈鼎新
沈嘉祺 肖汉梁 杜荣铭 邱友鹤 邵祖德 何志渔 张 俊 张一公
张乐天 张金昌 张荣一 张惠康 张 俊 张德鑫 金华建 金志鸿
金 辉 周尧兴 周永端 周宗仪 周劲南 周轶尘 周继良 杨百生
杨春龄 杨烈宇 杨剑挥 杨绳祖 郑凤阁 郑诗谦 郑克钊 郑德和
单中柱 林发森 易 让 罗章文 罗 云 范定华 范恂如 胡本礼
胡正良 胡行定 胡宗麟 柯永久 费 千 郭志豪 赵兴贤 荣次仙
冒天诚 涂光莹 钟学添 查其恺 祝怡德 洪惠领 侯增源 钱天祉
钱永年 钱宇清 钱耀南 钱耀鹏 施兴之 徐以介 徐 敏 徐绍衡
唐克嶂 唐明斗 唐开元 高万功 高孝洪 顾仲声 顾宣炎 韩 魁
贾欣乐 殷福荣 殷佩海 晏君志 倪 暹 聂德耀 袁儒堂 黄伦坤
黄郁南 黄德康 黄德星 盛百正 盛知恒 梁继昌 梁莲静 崔可润
崔存纲 阎永健 隆玄民 蒋广生 蒋淦清 蒋慰昌 童舜坤 曾长荪
曾兆钰 曹佐舜 谢开进 谢 敏 舒元发 舒宏纪 葛洪钧 鲍廷秀
程德骏 满一新 詹宗勉 熊 炬 龚三省 黎明森 黎树明 潘延龄
滕毓富

各卷编辑人员

王立群 牛求煌 孙起运 任建中 李 潜 钱耀鹏 陈民扬 汪育才
张向东 周国雄 金振远 柯永久 赵兴贤 倪 暹 蒋明耀 蒋淦清

目　录

第 1 卷

轮机工程基础

第1篇　理论基础

第1章　工程力学

1　受力分析

1.1　物体与杆件的受力

物体受力时，会引起运动状态的变化及本身变形。为研究和确定物体受力时的运动规律，及杆件受力时的情况，必须对受力的物体进行分析，以确定作用于物体上所有力的特性及其相互关系。

1.2　刚体与变形体

1.2.1　刚体

刚体为理想化的物体，刚体受力时，在它里面任何两个质点间的距离，不因力的作用而发生改变。实际上物体受力时，其大小和形状都会有变化。只有在研究的问题中，当物体的大小和形状的变化可以忽略不计时，才可以把它当作刚体。

1.2.2　变形体

在研究物体受力后为抗力情况时，必须以其受力后的变形情况为基础。此时应将受力物体视为变形体。若所受之力卸去后，物体能恢复原状，则为弹性体，其变形为弹性变形。

1.3　力的种类

1.3.1　最基本的量

对物体进行受力分析时，最基本的量为力和力偶。

1)力　常用符号$\overline{F}$、$\overline{R}$、$\overline{P}$等来表示，它是一个矢量，其作用效果由三要素——大小、方向、作用线决定。其合成和分解，均应满足平行四边形法则。力的法定度量单位为牛(顿)，N，或千牛，kN。工程单位制的度量单位为公斤力kgf，其换算关系为1 kgf=9.8 N。

2)力偶　力偶由两个等值反向的平行力组成，常用符号$\overline{M}$表示。力偶也是矢量，其作用效果由三个要素——力偶矩的大小、方位及转向所决定。力偶矩的法定度量单位为牛顿米，Nm，或千牛米，kNm，大小由力偶中任一个力的大小与力偶臂（两力间的垂直距离）的乘积决定。其作用方位为力偶所在平面的法线方向，转向则由右手定则确定（如图1.1.1-1所示）。

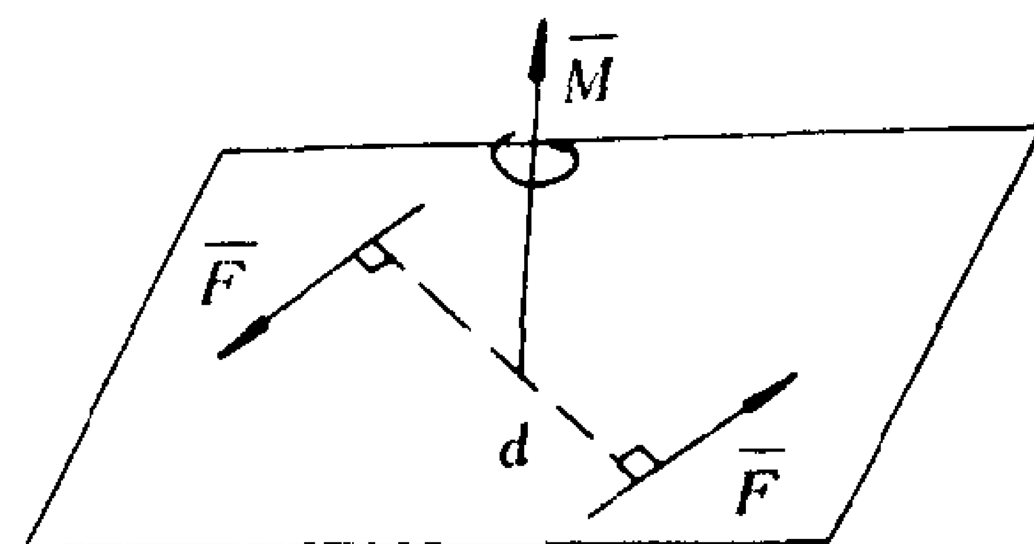


图1.1.1-1　力偶

1.3.2　力的种类

1)按作用方式分类

(1)集中力　通过物体表面一点附近的微小面积直接作用在物体上的力（如图 1.1.1-2 中a)所示)。

(2)分布力　沿物体表面部分长度或部分面积上按一定规律连续分佈作用的力，如图 1.1.1-2 中b)所示。

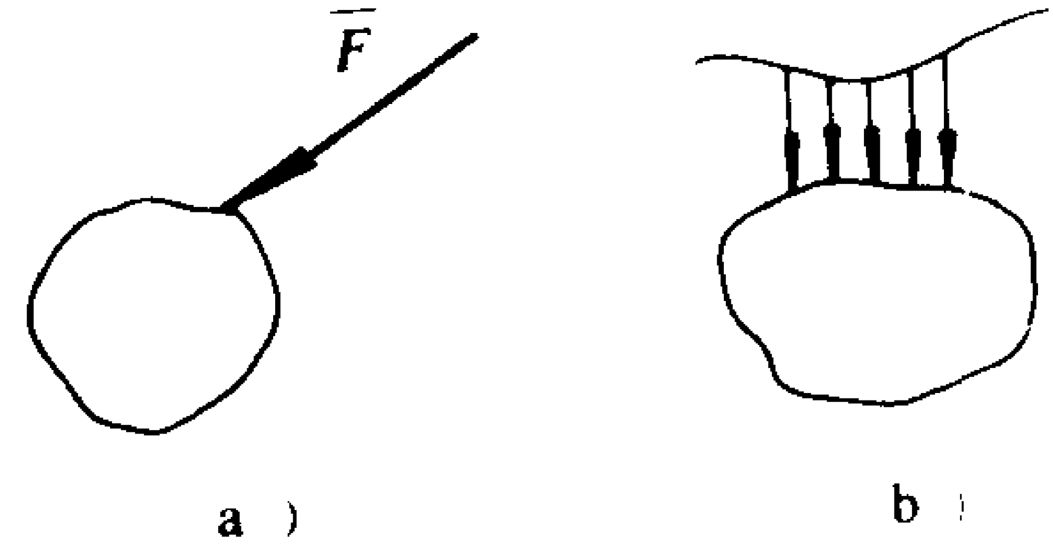


图 1.1.1-2　集中力与分布力

2)按受力性质分类

(1)主动力　主动作用到受力物体的力，又称为载荷。

(2)约束反力　受力物体所受到的运动限制称为约束，当物体在约束阻碍方向有运动趋势时，约束对物体的作用力，称为约束反力。约束反力的方向总是与约束所阻碍的运动方向相反，常见的约束及其约束反力的方向，可参见表 1.1.1-1。

表 1.1.1-1　常见的约束类型及约束反力的画法

约束类型	实例	约束反力画法	说明
柔索			约束反力作用在连结点上，其作用线沿柔索指向背离物体，使柔索受拉力作用。柔索为曲线状态时，约束反力系沿作用点的切线方向
光滑接触面			约束力通过接触点，沿接触表面在该点的公法线方向，并指向物体，使物体受压
轴承支座			约束力作用线通过销孔中心，其方向由受力情况而定，通常用它的两个相互垂直的分力 N_x、N_y 来代替
铰链支座			

续上表

约束类型	实例	约束反力画法		说明
固定端(或插入端)支座				作用在同一平面内，约束力N_x、N_y及力偶M，方向由受力情况而定
辊轴支座				约束力通过销孔中心而垂直于支承面
球铰				约束反力过球窝中心，方向不能预先定出。通常用它的三个相互垂直的分力代替。

3)按力随时间变化的情况分类

(1)静载荷　力从零开始缓慢而平稳地增加到最后值，并不再变化，称为静载荷。

(2)冲击载荷　在很短时间内，力从零开始增加到最大值的瞬时载荷。

(3)重复载荷　大小和方向作周期性变化的载荷。

1.4　物体的受力分析

受力分析通常按以下的方法和步骤：

1)确定研究对象，将实际的结构简化成力学模型。

2)分析主动力，包括各种载荷。

3)参照约束反力图，分析有约束处的约束反力。

4)将所有的力绘成物体受力图。

例：气阀装置如图1.1.1-3所示，曲杠杆BAC可绕A轴转动，杠杆通过推动滚子B使杠杆顺时针转动，再通过螺钉C推动气阀，试对曲杠杆BAC进行受力分析。

解：按受力分析的方法步骤：

1)以曲杠杆BAC为研究对象。

2)分析主动力，包括凸轮对滚子B的推力$\bar{Q}$(不计摩擦)及螺钉C所受的气压阻力$\bar{P}$。

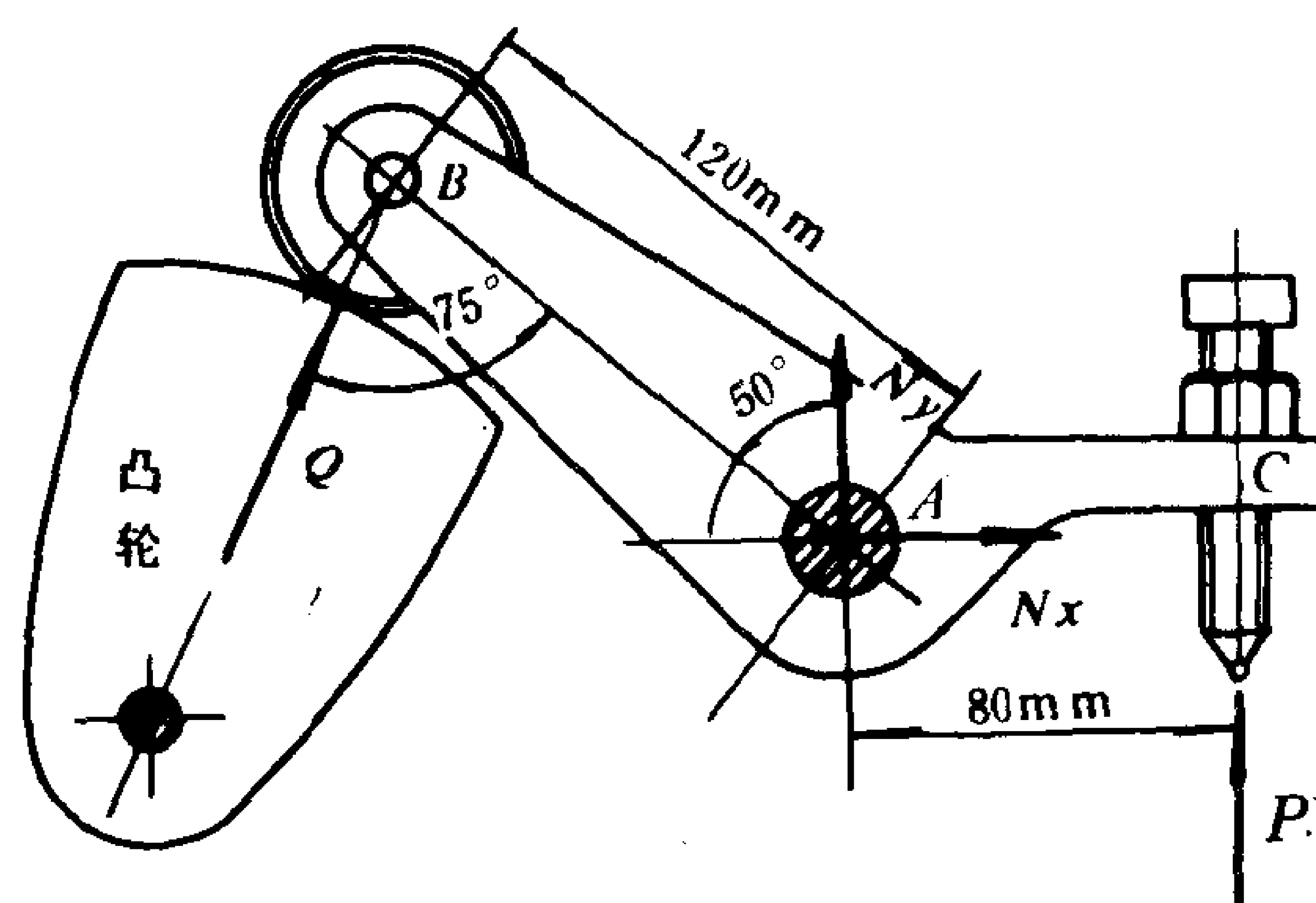


图1.1.1-3　受力图

3)分析约束反力，约束在A处，属

于光滑铰链支座形式，约束反力$\overline{N}_x$，$\overline{N}_y$。

4）作BAC的受力图，图 1.1.1-3 所示。

2 力系的平衡条件

作用在物体上的一群力称为力系。物体受力时，若相对地球处于静止或匀速直线运动时，即为平衡状态，作用于其上的力系称为平衡力系，平衡力系的诸力之间，应满足平衡条件。

2.1 力系的分类

为建立各种不同力系的平衡条件，首先通过区别力系中各力作用线的不同情况，对力系作如下分类

1）物体上作用两个力。

2）物体上作用三个力。

3）平面力系，物体上所有作用力均在同一平面内，包括平面汇交力系，平面平行力系及平面任意力系。

4）空间力系　包括空间汇交力系，空间平行力系及空间任意力系。

2.2 力的投影与力矩

2.2.1 力的投影

力$\overline{F}$在直角坐标轴ox，oy，oz上的投影，分别为F_x、F_y、F_z，是标量，其计算公式可见下表。

表 1.1.1-2　　力　的　投　影

名称	简　　图	公　　式	说　　明
平面	y, b₁, B, F, β, α, F_y, a₁, A, 0, a, F_x, b, x	$F_x=F\cos\alpha$ $F_y=F\sin\alpha$ α为F与x轴的夹角	当力平行于投影轴时，其投影的绝对值等于力的大小。当力垂直于投影轴时，其投影为零。
空间	直接投影	直接投影： $F_x=F\cos\alpha$ $F_y=F\cos\beta$ $F_z=F\cos\gamma$	α、β、γ分别为力F与x、y、z轴正方向的夹角。
空间	二次投影	二次投影： $F_1=F\sin\gamma$ $F_z=F\cos\gamma$ $F_x=F\sin\gamma\cos\theta$ $F_y=F\sin\gamma\sin\theta$	先将力F投影到A_{xy}平面上得F_1，力F向z轴投影得F_z，再将F_1投影在x和y轴上，即分别得F_x和F_y

2.2.2 力矩

力矩代表力使物体绕一轴的旋转趋势，其定义如下：

1）力$\overline{F}$作用于与oz轴垂直的平面中时，如图 1.1.1-4 中a）所示，力$\overline{F}$对oz轴之矩的大小，

为力$\overline{F}$的大小与o点到力$\overline{F}$作用线的垂直距离d（力臂）的乘积$F\times d$，以绕轴逆时针转向为正(右手定则)。力矩值的法定单位为牛顿米，Nm，或千牛米，kNm，常用符号为$m_z(\overline{F})$；表示力$\overline{F}$对oz轴之矩。

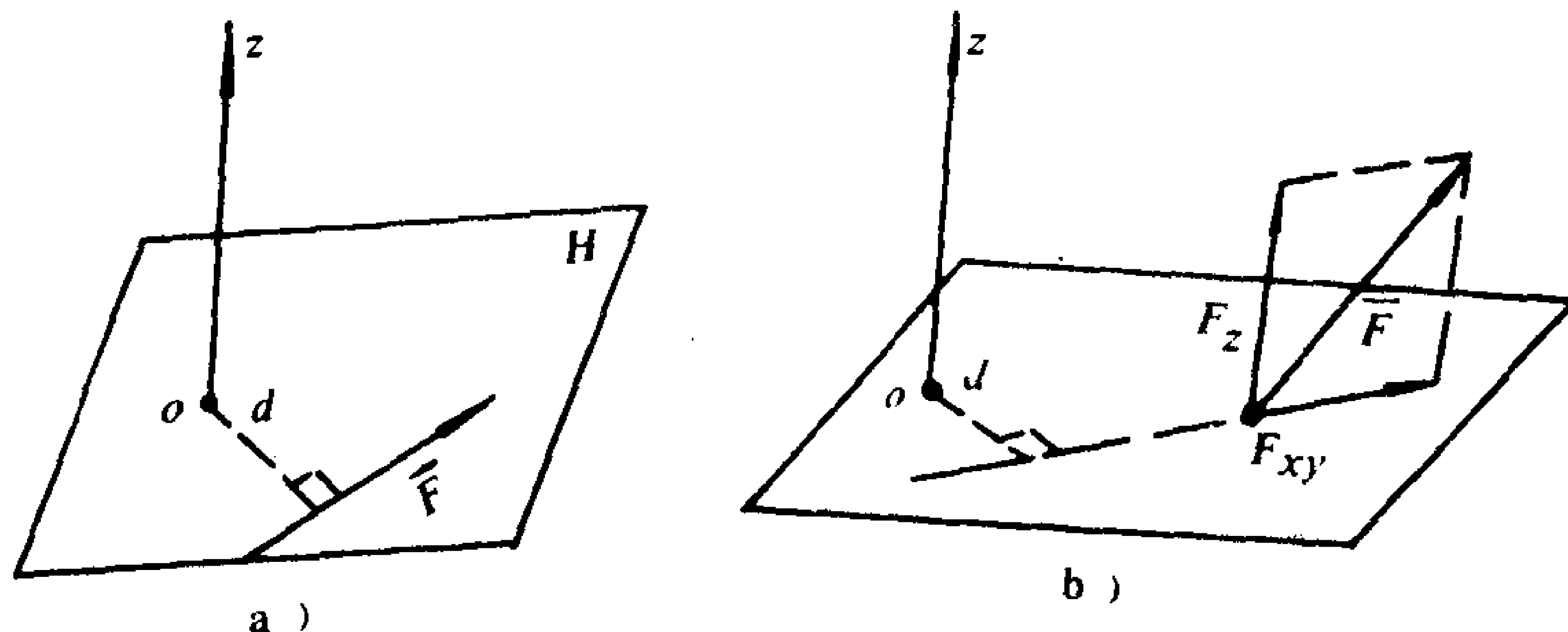


图 1.1.1-4 力矩

2)力$\overline{F}$作用线不在与oz轴垂直的平面中时，应先按上节要求将$\overline{F}$分成在与oz轴垂直的oxy平面中的投影F_{xy}，及与oz轴平行的投影F_z，然后按定义得出F_{xy}对oz轴之力矩，即为力$\overline{F}$对oz轴之力矩$m_z(\overline{F})$，如图 1.1.1-4 中b)所示。

3)力对轴之矩是代数量，几个力对同一轴之矩之和，即为各力分别对同一轴取矩后的代数和：

$$\sum m_z(\overline{F_i})=\sum m_z(\overline{F_1})+\sum m_z(\overline{F_2})+\cdots。\quad(1.1.1\text{-}1)$$

2.3 力系的平衡条件与平衡方程

2.3.1 两力平衡条件

作用于一刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的必要和充分条件是：两个力大小相等方向相反，并沿同一作用线。

2.3.2 三力平衡条件

刚体受三力作用而平衡，此三个力必在同一平面内，汇交于一点，合力$\overline{R}=\sum\overline{F}=0$。

2.3.3 力系的简化和合成

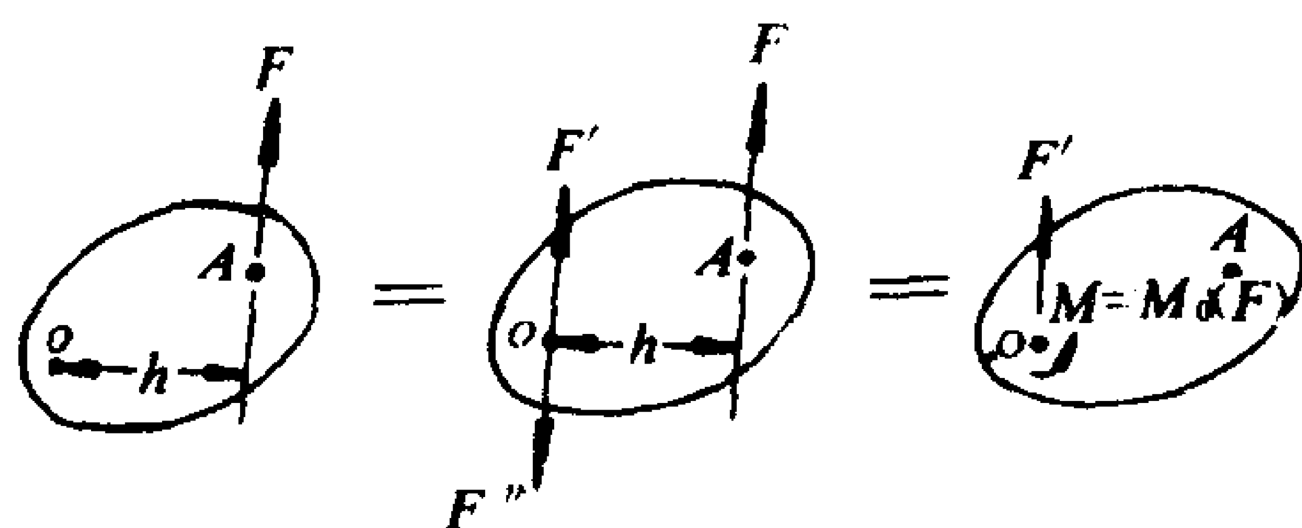


图 1.1.1-5 力线平移

刚体上受到三个以上力的作用时，须先将力系简化，再分析简化结果并导出平衡条件。简化依据为力线平移定理（如图 1.1.1-5 所示)。将力系中的各力，都平移到同一个简化中心点o。每个力平移之后，为使其与原来的力等效，必须再附加一个力偶。力系平移到o点后，得到一个汇交力系，其合力等于原力系的主矢，用$\overline{R_0}$表示，附加的力偶合成一个合力偶矩$\overline{M_0}$，称为力系对o点的主矩$\overline{M_0}$。主矢$\overline{R_0}=\sum\overline{F}$，与简化中心位置无关，主矩$\overline{M_0}=\sum\overline{M}$，随简化中心位置而变，对不同力系向任意点简化的结果进行分析，导出不同力系的平衡条件。

2.3.4 平面汇交力系

刚体所受的力均在同一平面oxy内且汇交于一点，其平衡条件为主矢$\overline{R_0}=0$（即合力为0)。平衡方程为

$$\sum F_x=0\qquad\sum F_y=0\quad(1.1.1\text{-}2)$$

用上述两个力的投影式，可解两个未知量。

2.3.5 平面任意力系

刚体所受到的力均在同一平面oxy内，但既不汇交于一点，又不完全相互平行。其平衡条

件为主矢$\overline{R_0}=0$；主矩$\overline{M_0}=0$，平衡方程为

$$\begin{cases}\sum F_x=0\\ \sum F_y=0\\ \sum M_A=0\end{cases} \quad \text{或} \begin{cases}\sum F_x=0\\ \sum M_A(\overline{F})=0\\ \sum M_B(\overline{F})=0\end{cases} \quad \text{或} \begin{cases}\sum M(\overline{F})=0\\ \sum M_B(\overline{F})=0\\ \sum M_C(\overline{F})=0\end{cases} \tag{1.1.1-3}$$

其中A、B、C三点为平面中任取的点，但在第二组方程中，A、B两点联线不能与x轴垂直，第三组方程式中，A、B、C不能在同一直线上。用任意一组方程，均可解三个未知量。

若在oxy平面中，所有的力均互相平行，则可取y轴与各力作用线平行，平衡条件$\overline{R_0}=0$，与$\overline{M_0}=0$，平衡方程变为：

$$\begin{cases}\sum F_y=0\\ \sum M_A(\overline{F})=0\end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases}\sum M_A(\overline{F})=0\\ \sum M_B(\overline{F})=0\end{cases} \tag{1.1.1-4}$$

其中A、B两点任取，但A、B联线不能与y轴平行，用任意一组方程，均可解两个未知量。

2.3.6 空间汇交力系

刚体所受到的力不全在同一平面内，但汇交于同一点，其平衡条件为合力$\overline{R}=0$；平衡方程为：

$$\sum F_x=0;\ \sum F_y=0;\ \sum F_z=0 \tag{1.1.1-5}$$

可解三个未知量。

2.3.7 空间任意力系

这是最一般的力系情况，刚体上所受到的力既不在同一平面内，又不全汇交于一点或完全相互平行。其它力系均可视为这种力系的特殊情况。其平衡条件仍为主矢$\overline{R_0}=0$，及主矩$\overline{M_0}=0$。平衡方程的常用形式为

$$\begin{cases}\sum F_x=0; & \sum M_x(\overline{F})=0\\ \sum F_y=0; & \sum M_y(\overline{F})=0\\ \sum F_z=0; & \sum M_z(\overline{F})=0\end{cases} \tag{1.1.1-6}$$

三个力的投影式与对三个坐标轴的力矩式，可解六个未知量。

2.3.8 平衡方程的应用

例：气阀装置中曲杠杆BAC可绕A轴转动，尺寸结构如图 1.1.1-6 所示，杠杆通过凸轮推动滚子B作顺时针转动，再通过螺钉C推动气阀。已知工作阻力$P=150$ N，试求杠杆平衡时凸轮的推力Q与轴承A处的约束反力。

解：步骤如下：

1)选取BAC为研究对象。

2)作BAC的受力分析图。

3)分析力系——属于平面任意力系。

4)选取坐标轴Bxy如图所示。

5)应用平面任意力系平衡方程(1.1.1-3)：

$\sum F_x=0 \qquad N_x+Q\sin\alpha=0$

$\sum F_y=0 \qquad -Q\cos\alpha-N_y-P=0$

$\sum M_B(\overline{F})=0 \quad N_y\cdot AB\cos\beta+N_xAB\sin\beta+P\cdot(BO+AB\cos\beta)=0$

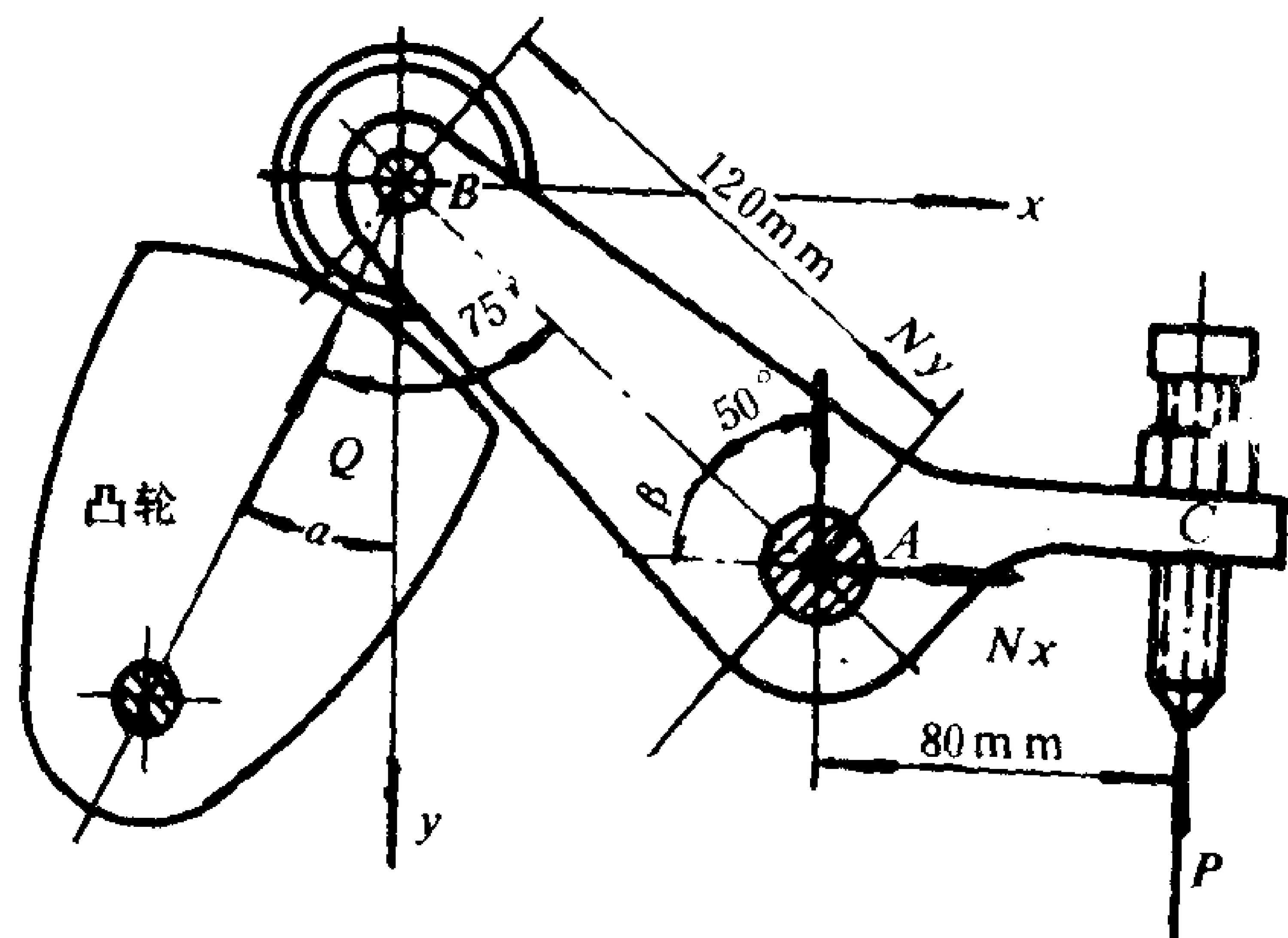


图 1.1.1-6 平衡方程应用

将已知值：$AB=0.12\ \text{m}$，$\alpha=25°$，$\beta=40°$，及$P=150\ \text{N}$代入上式可解出：

$$Q=103.5\ \text{N};\quad N_x=-43.75\ \text{N};\quad N_y=-24.3\ \text{N}。$$

"－"号表示与图示方向相反。

2.4 有摩擦情况下的平衡问题

2.4.1 滑动摩擦

表 1.1.1-3　　　　　　　　　　　　**常用材料的摩擦系数**

摩擦材料	滑动摩擦系数(μ或μ')		摩擦材料	滑动摩擦系数(μ或μ')	
	无润滑	有润滑		无润滑	有润滑
钢-钢	0.1	0.05~0.1	青铜-钢	0.16	—
	(0.15)	(0.1~0.12)	青铜-夹布胶木	0.23	—
钢-软钢	0.2	0.1~0.2	青铜-树脂	0.21	—
钢-铸铁	0.16~0.18	0.05~0.15	青铜-硬橡皮	0.36	—
	(0.2~0.3)		铝-黄铜	0.27	0.02
钢-黄铜	0.19	0.03	铝-青铜	0.22	—
钢-青铜	0.15~0.18	0.07	铝-钢	0.30	0.02
		(0.1~0.15)	铝-夹布胶木	0.26	—
钢-铝	0.17	0.02	硅铝合金-夹布胶木	0.34	—
钢-轴承合金	0.2	0.04	硅铝合金-树脂	0.28	—
皮革-铸铁或钢	0.30~0.50	0.12~0.15	硅铝合金-硬橡胶	0.25	—
木材(硬木)-铸铁或钢	0.20~0.35	0.12~0.16	钢-粉末冶金	(0.35~0.55)	—
软钢-铸铁	0.18	0.05~0.15	木材-木材 纹路平行时	0.48(0.62)	0.07~0.10
	(0.2)		木材-木材 纹路垂直时	0.32(0.54)	(0.1)
软钢-青铜	0.18	0.07~0.15	45号淬火钢-聚甲醛	0.46	0.016
	(0.2)		45号淬火钢-聚碳酸脂	0.30	0.03
铸铁-铸铁	0.15	0.07~0.12	45号淬火钢-尼龙9	0.57	0.02
		(0.15~0.16)	(加3%MoS_2填充料)		
铸铁-青铜	0.15~0.21	0.07~0.15	45号淬火钢-尼龙9	0.48	0.023
	(0.28)	(0.16)	(加30%玻璃纤维填充物)		
皮革-木料	0.03~0.05	—	45号淬火钢-尼龙1010	0.039	—
	(0.4~0.5)		(加30%玻璃纤维填充物)		
铜-铜	0.20	—	45号淬火钢-尼龙1010	0.07	—
黄铜-黄铜	0.17	0.02	(加40%玻璃纤维填充物)		
黄铜-钢	0.30	0.02	45号淬火钢-氯化聚醚	0.35	0.034
黄铜-硬橡胶	0.25	—	45号淬火钢-苯乙烯-	0.35~0.46	0.018
青铜-黄铜	0.16	—	丁二烯-丙烯腈共聚体		
青铜-青铜	0.15~0.20	0.04~0.10	(ABS)		

注：表中括号内为静滑动摩擦系数μ，否则为动滑动摩擦系数μ'，这些滑动摩擦系数是试验数值，只能作为近似计算时的参考。

当两物体间有相对滑动或滑动趋势时，在接触处的公切面上产生阻力，称为滑动摩擦力。对于仅有滑动趋势的情况，摩擦力称为静滑动摩擦力，其大小在一定范围内($0\leq F\leq F_{max}$)随物体的受力情况而变，具体数值须由平衡方程计算确定，最大摩擦力F_{max}与物体间的正压力N成正比，即：

$$F_{max}=\mu N \tag{1.1.1-7}$$

式中，μ为静滑动摩擦系数。

当两物体沿接触面有相对滑动时，摩擦力称为动滑动摩擦力，其大小近似地视为常数。

$$F'=\mu' N \tag{1.1.1-8}$$

式中，μ'为动滑动摩擦系数。摩擦力的方向总是与相对滑动或滑动趋势的方向相反，摩擦系

数可通过实验测定，常用材料间的近似摩擦系数见表 1.1.1-3。

例：推杆凸轮机构（如图 1.1.1-7 中a）所示）中，推杆与滑道间的摩擦系数为μ（不计推杆与凸轮间的摩擦）试计算滑道的宽度为多大时，推杆才不被滑道卡住。

图 1.1.1-7 例图

解：取推杆为研究对象，并作受力分析如图 1.1.1-7 中b)，所示。推杆上的摩擦力N_A及N_B必须满足 $F_A \leq \mu N_A$；　$F_B \leq \mu N_B$

平衡方程　$\Sigma F_x = 0$　得　$N_A - N_B = 0$

$\Sigma F_y = 0$　得　$P - Q - F_A - F_B = 0$

$\Sigma M_A(\bar{F}) = 0$　得　$\left(a + \frac{D}{2}\right)P - \frac{D}{2}Q - bN_B - DF_B = 0$

应用临界条件，$\mu N_A = F_A$；$\mu N_B = F_B$　代入上式

解得　$$b = \frac{2\mu Pa}{P - Q}$$

为满足滑动摩擦条件：$F_A \leq \mu N_A$和$F_B \leq \mu N_B$，

必须　$$b \geq \frac{2\mu Pa}{P - Q}$$

2.4.2　滚动摩擦

当物体间有相对滚动或滚动趋势时，在接触处所受到的阻碍，即为滚动摩擦，其作用相当于受到一个阻力偶，如图 1.1.1-8 所示。阻力偶的大小，随外力作用不同而变化，当物体处于将滚未滚的临界状态时，滚动摩擦力偶矩达到最大值，其大小与两物体接触处的法向正压力成正比，即

$$M_{max} = kN \qquad (1.1.1\text{-}9)$$

式中，k为滚动摩擦系数，量纲为长度，单位常用cm，可通过实验测定，常用的近似值列于下表：

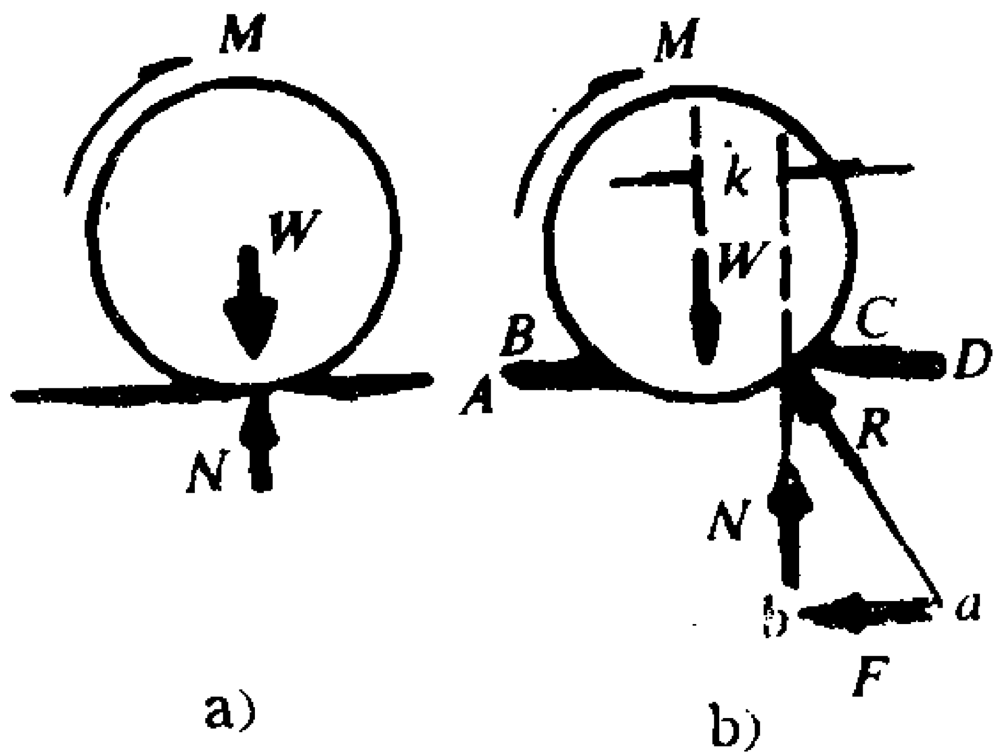


图 1.1.1-8　滚动摩擦

表 1.1.1-4　**滚动摩擦系数**

摩擦副材料	滚动摩擦系数 k cm	摩擦副材料	滚动摩擦系数 k cm
淬火钢-淬火钢	0.001	木材-木材	0.05～0.08
铸铁-铸铁	0.05	铁或钢质车轮-木面	0.15～0.25
木材-钢	0.03～0.04	钢质车轮-钢轨	0.05

3 质心、平面图形几何性质、转动惯量

3.1 质心

3.1.1 质心位置的确定

由计算公式

$$x_c=\frac{\int x\cdot dm}{m};\quad y_c=\frac{\int y\cdot dm}{m};\quad z_c=\frac{\int z\cdot dm}{m} \tag{1.1.1-10}$$

所确定的坐标x_c、y_c、z_c称为物体的质心，式中m为物体的质量，dm为坐标在x、y、z处微块的质量。对于均质物体，它们的质心与形心相重合。此时质心或形心坐标的计算公式如下：

均　质　体	均质薄板	均质细杆
$x_c=\frac{\int xdv}{V}$	$x_c=\frac{\int xdA}{A}$	$x_c=\frac{\int xdl}{L}$
$y_c=\frac{\int ydv}{V}$	$y_c=\frac{\int ydA}{A}$	$y_c=\frac{\int ydl}{L}$
$z_c=\frac{\int zdv}{V}$	$z_c=\frac{\int zdA}{A}$	$z_c=\frac{\int zdl}{L}$

(1.1.1-11)

式中，V、A、L分别为体积、面积和长度；dv、dA、dl分别为微块的体积、面积及长度。

按上式计算所得的一些简单形状的均质构件的质心位置，列于表 1.1.1-5 中。

表 1.1.1-5　　**简单形状均质构件的质心位置**

构件形状	质心 C 的位置	构件形状	质心 C 的位置
弓形平板	$x_c=\frac{4r\sin^3\alpha}{3(2\alpha-\sin 2\alpha)}$ 式中　α单位为rad	三角形平板	位于三中线的交点（三角形的中心） $y_c=\frac{H}{3}$
梯形平板	位于平行边中点的连线上 $y_c=\frac{H}{3}\cdot\frac{a+2b}{a+b}$	圆弧线段	$x_c=\frac{r\sin\alpha}{\alpha}$ 式中　α单位为rad

续上表

构件形状	质心 C 的位置	构件形状	质心 C 的位置
扇形平板	$x_c=\dfrac{2r\sin\alpha}{3\alpha}$ 式中 α 单位为rad	抛物线平板	$x_{c_1}=\dfrac{3}{5}a$，$y_{c_1}=\dfrac{3}{8}b$； $x_{c_2}=\dfrac{3}{10}a$，$y_{c_2}=\dfrac{3}{4}b$

3.1.2 组合体的质心

组合体的质心，可按下式进行计算：

$$x_c=\frac{\sum m_i x_i}{m};\quad y_c=\frac{\sum m_i y_i}{m};\quad z_c=\frac{\sum m_i z_i}{m} \tag{1.1.1-12}$$

式中：m_i——组合体中各构件的质量；

x_i、y_i、z_i——组合体中各构件质心坐标；

m——组合体的质量。

对于一些形状复杂的物体，可把它看成由若干个简单形状构件所组成的组合体，然后用上述公式来确定其质心位置。

例：图示某箱形结构梁的截面 $a=5$ cm，$b=1.6$ cm，$h=140$ cm，$d=86$ cm，求截面形心的坐标 x_c、y_c。

解：取坐标轴如图所示，由于截面有对称轴 y，形心必在 y 轴上，即 $x_c=0$。

将图示截面分成由 1、2、3、4 四个矩形，面积分别为 $A_1=ad$；$A_2=bd$；$A_3=A_4=b(h-a-b)$。各矩形的形心位置分别为 $y_1=a/2=2.5$ cm；$y_2=h-\dfrac{b}{2}=139.2$ cm；$y_3=y_4=\dfrac{1}{2}(h-a-b)+a=71.7$ cm。

代入形心公式得：

$$y_c=\frac{\sum m_i y_i}{m}=\frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}=\frac{A_1y_1+A_2y_2+A_3y_3+A_4y_4}{A_1+A_2+A_3+A_4}=51\text{ cm}$$

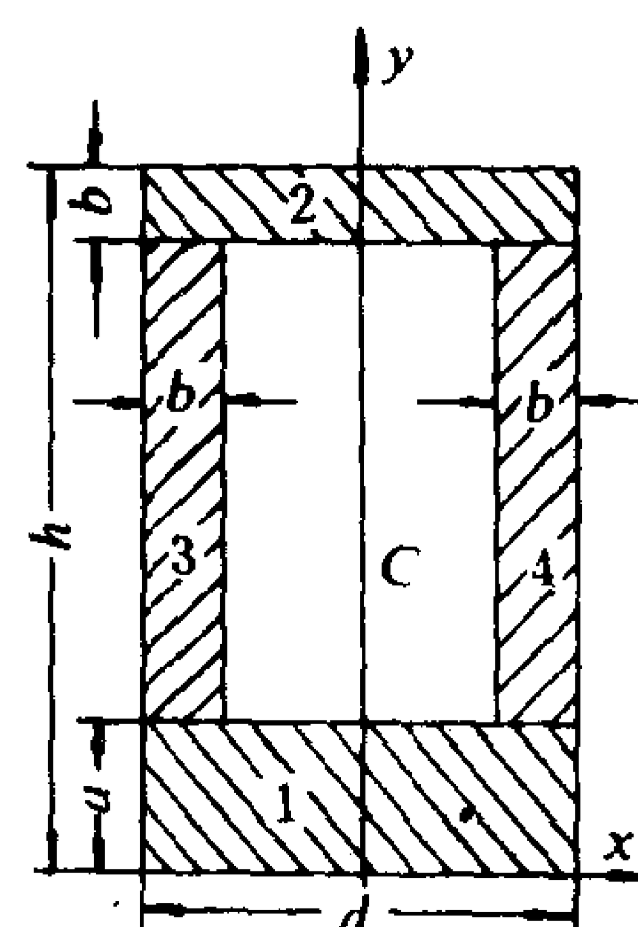


图 1.1.1-9 组合截面形心

3.2 平面图形的几何性质

3.2.1 静矩、惯矩、惯积、极惯矩

平面图形对于 x 轴及 y 轴的静矩、惯矩、惯积、极惯矩的定义及计算公式见表 1.1.1-6。

平面图形的静矩及惯积可能为正值、负值、或零。而惯矩和极惯矩则恒为正值。当图形对某一对坐标轴的惯积为零时，则该两轴都称为主惯轴。图形对主惯轴的惯矩称为主惯矩。一般情况下，确定平面图形的主惯轴方法比较复杂，但由惯积的数学式可知，具有对称轴的平面图形，对称轴及垂直于对称轴的所有坐标轴，均为主惯轴。通过形心的主惯轴，称为形心主惯轴。

表 1.1.1-6　　静矩、惯矩、惯积、极惯矩的计算公式

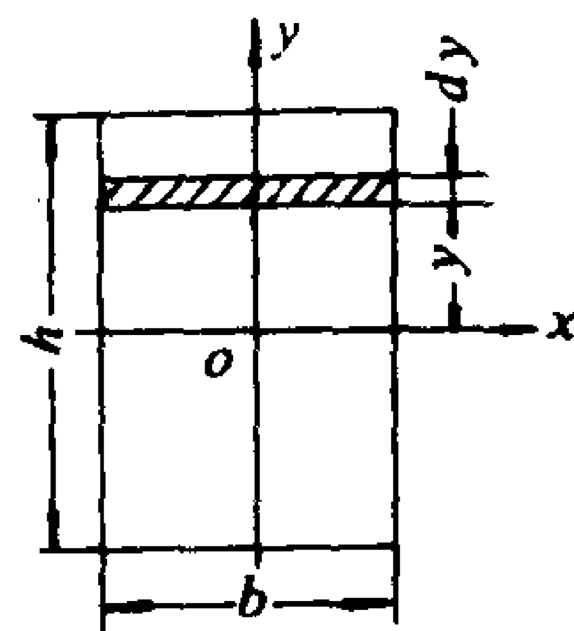
截面几何性质	单个图形	组合图形
静　矩 cm³	$S_x=\int_A ydA=Ay_c$ $S_y=\int_A xdA=Ax_c$	$S_x=\sum A_i y_i=Ay_c$ $S_y=\sum A_i x_i=Ax_c$
惯　矩 cm⁴	$I_x=\int_A y^2dA$ $I_y=\int_A x^2dA$	$I_x=\sum\int_{A_i} y^2dA=\sum(I_x)_i$ $I_y=\sum\int_{A_i} x^2dA=\sum(I_y)_i$
惯　积 cm⁴	$I_{xy}=\int_A xydA$	$I_{xy}=\sum\int_{A_i} xydA=\sum(I_{xy})_i$
极惯矩 cm⁴	$I_p=\int_A \rho^2dA$	$I_p=\sum\int_{A_i}\rho^2dA$

例：计算矩形截面对其对称轴的惯矩。

解：由图，取$dA=bdy$

则 $$I_x=\int_A y^2dA=\int_{-h/2}^{+h/2}y^2bdy=\frac{bh^3}{12}$$

同理解得：$I_y=\frac{hb^3}{12}$



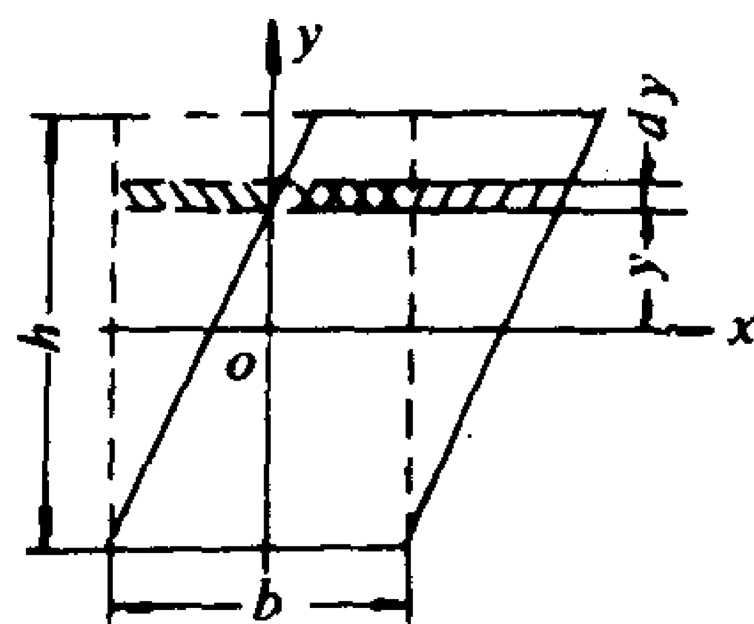


图 1.1.1-10　截面惯矩

从图中还可看出，与矩形同底等高的平行四边形，对x轴的惯矩由于I_x的表达式未变，所以仍为：

$$I_x=\frac{bh^3}{12}$$

但对y轴的情况，就完全不同，需要先确定y轴的位置，并按数学式进行运算后得出结果。

例：计算直角三角形对其两直角边的惯积。

解：由图，首先得

$$b(x)=\frac{b}{h}(h-y)$$

代入 $$I_{xy}=\int_A xydA=\int_A xydxdy$$

$$=\int_0^h ydy\int_0^{b(x)}xdx=\frac{b^2h^2}{24}.$$

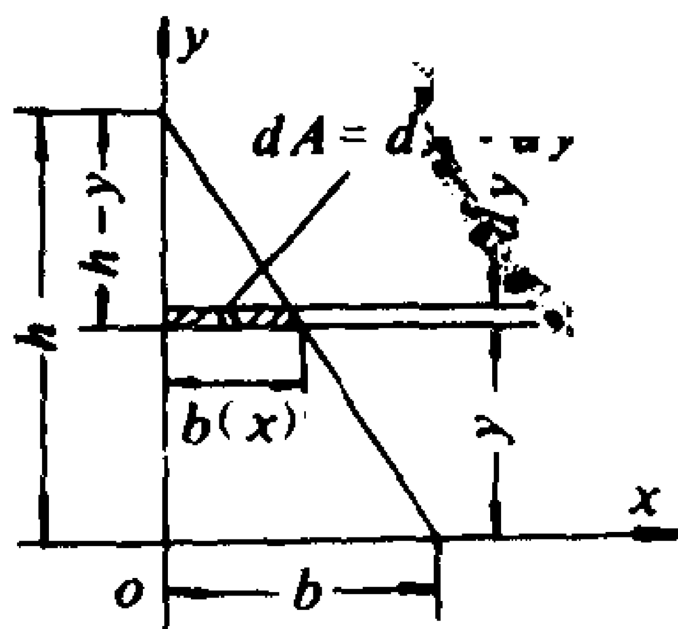


图 1.1.1-11　截面惯积

3.2.2　惯矩和惯积的平行移轴公式与转轴公式

惯矩和惯积，随选取不同坐标轴而异，在已知对某一坐标轴的惯矩与惯积之后，可通过平行移轴公式或转轴公式，求出对其它不同坐标轴的惯矩与惯积。关于惯矩与惯积的平行移轴公式和转轴公式，可见表 1.1.1-7。

表 1.1.1-7　　　　　　　　　　　　　**平行移轴公式和转轴公式**

图形与坐标轴	公式
x_0，y_0——通过形心的坐标轴 x，y——平行于x_0，y_0的坐标轴 a，b——形心至x，y轴的距离	平行移轴公式 $I_x=I_{x_0}+b^2A$ $I_y=I_{y_0}+a^2A$ $I_{xy}=I_{x_0y_0}+abA$
x，y——基本坐标轴 x'，y'——基本坐标轴绕o点旋转α角后的位置，α角逆时针转为正，反之为负 x_0，y_0——通过o点的主惯轴	转轴公式 $I_{x'}=\frac{I_x+I_y}{2}+\frac{I_x-I_y}{2}\cos 2\alpha-I_{xy}\sin 2\alpha$ $I_{y'}=\frac{I_x+I_y}{2}-\frac{I_x-I_y}{2}\cos 2\alpha+I_{xy}\sin 2\alpha$ $I_{x'y'}=\frac{I_x-I_y}{2}\sin 2\alpha+I_{xy}\cos 2\alpha$ 主惯轴位置和主惯矩公式 $\mathrm{tg}\,2\alpha_0=-\frac{2I_{xy}}{I_x-I_y}$（$\alpha_0$有两个主值，对应两个主惯轴） $I_{max}=\frac{1}{2}(I_x+I_y)+\frac{1}{2}\sqrt{(I_x-I_y)^2+4I_{xy}^2}$ $I_{min}=\frac{1}{2}(I_x+I_y)-\frac{1}{2}\sqrt{(I_x-I_y)^2+4I_{xy}^2}$

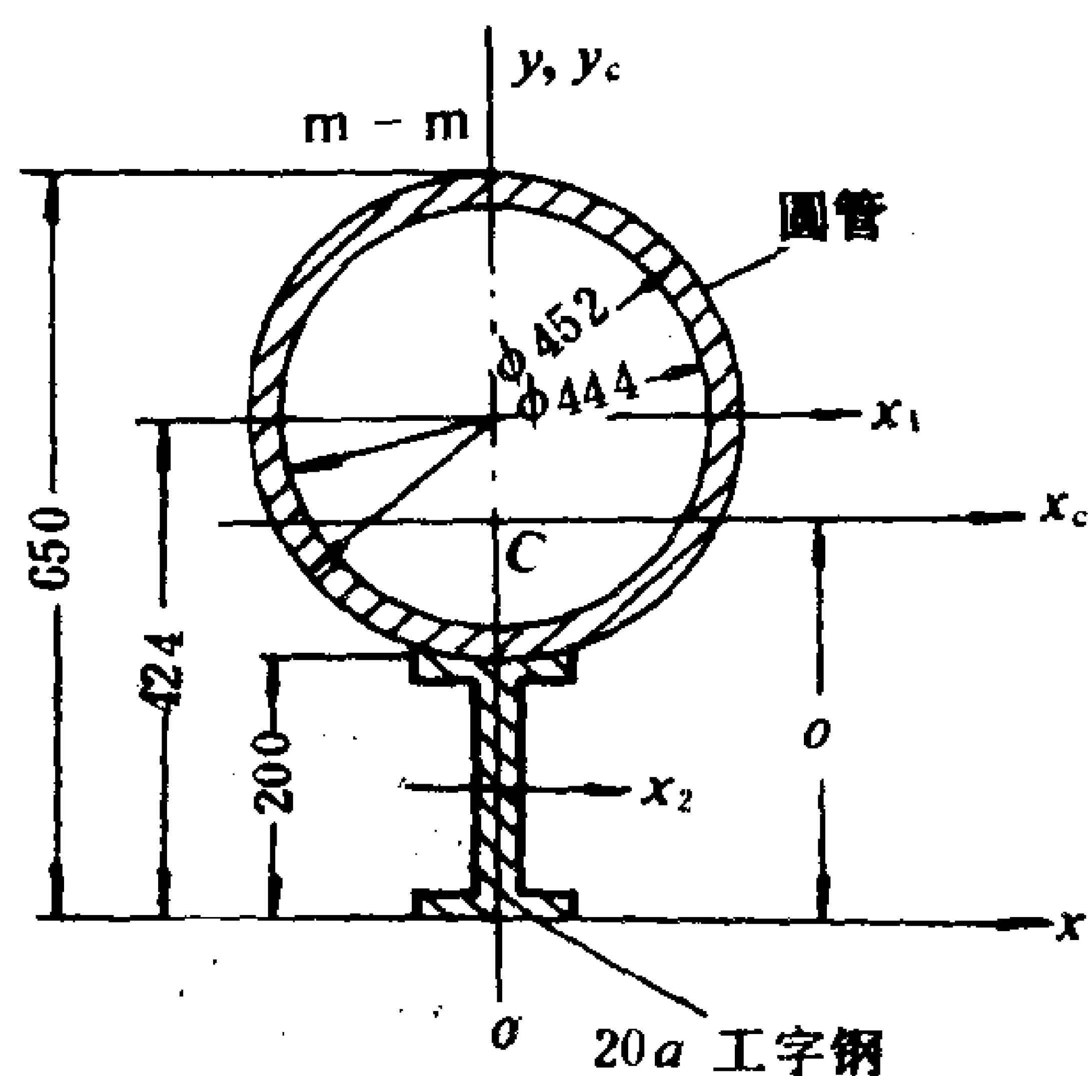


图 1.1.1-12　平行移轴公式应用

例：结构支架的横截面如图所示。求其形心主惯矩。

解：1）选定坐标轴oxy确定形心位置C。

由于横截面有对称轴y，所以截面形心位于此轴上，即：$x_c=0$；

$$y_c=\frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}=\frac{56.3\times 42.4+35.5\times 10}{56.3+35.5}$$

$$=29.9\ \mathrm{cm}$$

2）按平行移轴公式得出形心主惯矩。

通过（GB-706-65）查得 20_a工字钢有关截面参数并计算得各组成截面的有关数值为：

图形	Ai cm²	bi cm	b²ᵢAi cm⁴	Iyi cm⁴	Ixi cm⁴
圆管	56.3	12.5	8800	14180	14180
工字钢	35.5	19.9	14100	158	2370
总和	91.8	—	22900	14338	16550

应用平行移轴公式可得：

$$I_{y_c}=\sum(I_{y_c})_i=\sum I_{y_i}+\sum a_i^2 A_i=14338+0=14338\ \mathrm{cm^4}$$

$$I_{x_c}=\sum(I_{x_c})_i=\sum I_{x_i}+\sum b_i^2 A_i=16550+22900=39450\ \mathrm{cm^4}$$

3.2.3　常用截面的几何性质计算公式

常用截面的几何性质，其计算公式，可查表 1.1.1-8。

3.3 转动惯量

3.3.1 转动惯量的计算

转动惯量是构件在转动时惯性的度量，它与转动构件的质量大小及质量相对于转轴的分佈情况有关。对于希望获得较大的转动惯量的转动件，例如用以稳定发动机转速的飞轮，总是将大部分质量集中在远离转轴的轮缘附近，反之，分佈在靠近转动轴的部位，则可降低构件的转动惯量。

1)转动惯量的普遍公式

$$I_z=\sum m_i r_i^2 \qquad (1.1.1\text{-}13)$$

式中：I_z——构件对z轴的转动惯量，kg·m²；

m——构件上每一微块的质量，kg；

r——每一微块到转轴z的距离，m。

2)回转半径

假设构件的质量全部集中在距离z轴为ρ的圆周上，则转动惯量可表示为：

$$I_z=M\rho^2 \qquad (1.1.1\text{-}14)$$

式中：M——构件的质量，kg；

ρ——构件对z轴的回转半径，m。

一些简单形状构件的转动惯量及其回转半径的计算公式，可查表 1.1.1-9。

表 1.1.1-9　**简单形状构件的转动惯量**

构件形状	计算公式	构件形状	计算公式
细直杆	$I_z=\frac{1}{12}Ml^2$ $\rho=l/2\sqrt{3}$	薄圆环	$I_x=I_y=\frac{1}{2}MR^2$ $\rho=\frac{R}{\sqrt{2}}$
	$I_{z'}=\frac{1}{3}Ml^2$ $\rho=l/\sqrt{3}$		$I_z=MR^2$ $\rho=R$
薄板	$I_x=\frac{1}{12}Mb^2$ $\rho=b/2\sqrt{3}$	薄圆板	$I_x=I_y=\frac{1}{4}MR^2$ $\rho=\frac{R}{2}$
	$I_y=\frac{1}{12}Ma^2$ $\rho=a/2\sqrt{3}$		$I_z=\frac{1}{2}MR^2$ $\rho=\frac{R}{\sqrt{2}}$
	$I_z=\frac{1}{12}M(a^2+b^2)$ $\rho=\sqrt{(a^2+b^2)/12}$		

续上表

构件形状	计算公式	构件形状	计算公式
圆柱体	$I_y=\frac{1}{2}MR^2$ $\rho=R/\sqrt{2}$	球体	$I_z=\frac{2}{5}MR^2$ $\rho=\sqrt{\frac{2}{5}}R$
	$I_x=I_z=\frac{1}{4}MR^2+\frac{1}{12}Ml^2$ $\rho=\sqrt{(3K^2+l^2)/12}$		
	$I_{z'}=\frac{1}{4}MR^2+\frac{1}{3}Ml^2$ $\rho=\sqrt{(3R^2+4l^2)/12}$		
空心圆柱体	$I_y=\frac{1}{2}M(R^2+r^2)$ $\rho=\sqrt{(R^2+r^2)/2}$		
	$I_x=I_z$ $=\frac{1}{12}M\,[l^2+3(R^2+r^2)]$ $\rho=\sqrt{[l^2+3(R^2+r^2)]/12}$		

3.3.2 转动惯量的平行移轴公式

构件对任意轴z的转动惯量，等于构件对通过质心c并与z轴平行的z_c轴的转动惯量，再加上构件的质量与两轴间距离平方的乘积，即：

$$I_z=I_{zc}+Ml^2 \tag{1.1.1-15}$$

式中：M——构件的质量；

l——两平行轴z与z_c间的距离。

例：图示一发动机的飞轮，材料的密度为$\rho=0.0078\ \text{kg/cm}^3$，计算此飞轮对转轴的转动惯量$I$。

解：将整个飞轮按图 1.1.1-13 b)所示，分成几个部分，分别计算每一部分对轴的转动惯量，叠加之后得整个飞轮对转轴的I。

1)计算轮缘部份的转动惯量I_1

轮缘为空心圆柱体，其质量M_1为：

$$M_1=\gamma\pi(R^2-r^2)b=0.0078\pi(16^2-11.25^2)\times6=19\ \text{kg}$$

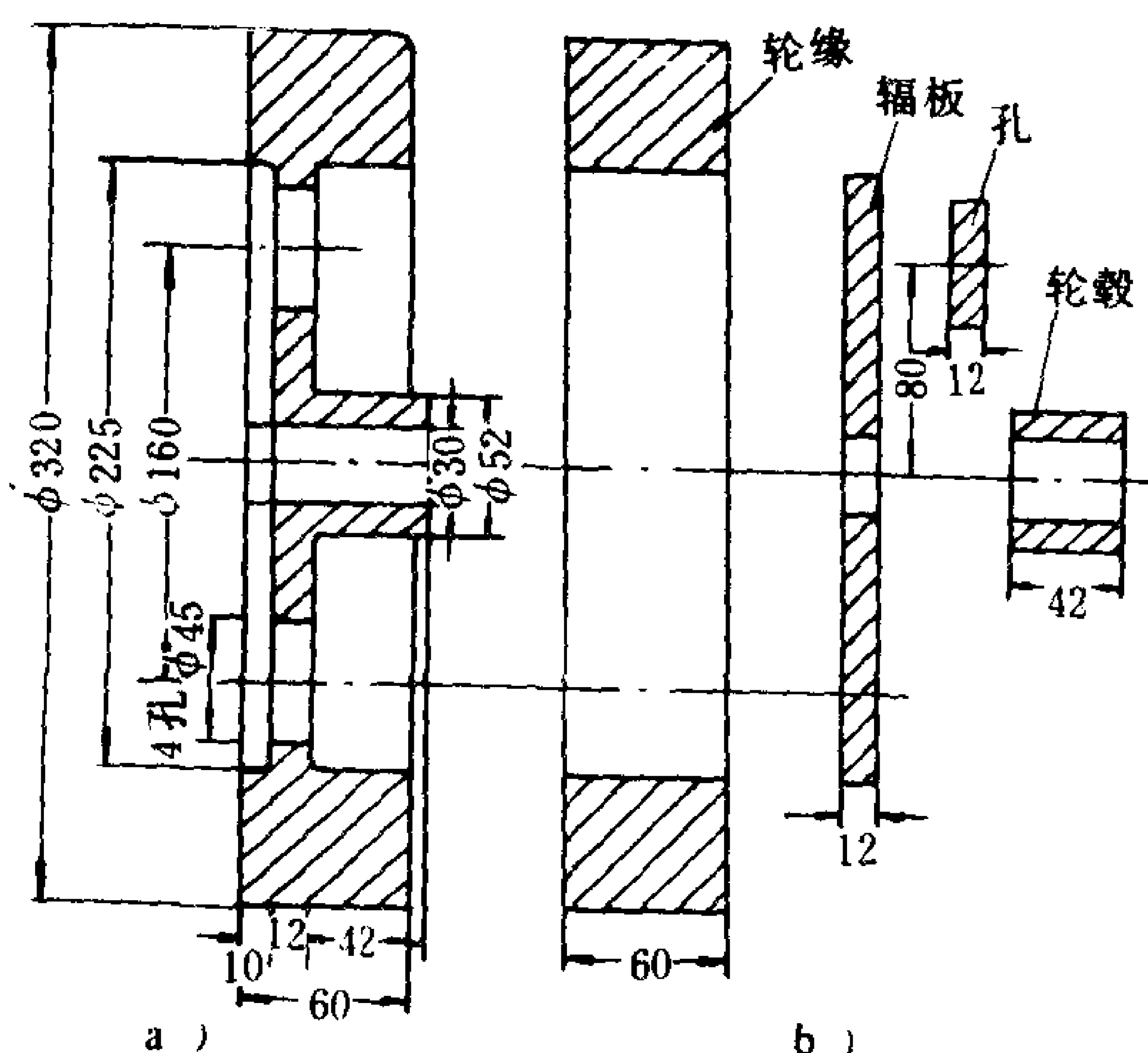


图 1.1.1-13

由表查得空心圆柱体对轴的转动惯量I_1为：

$$I_1=1/2M_1(R^2+r^2)=1/2\times19\times(16^2+11.25^2)=3634.3\ \text{kgcm}^2$$

2)计算辐板的转动惯量I_2

辐板（无孔）可按空心圆柱体计算，其质量M_2及转动惯量I_2分别为：

$$M_2=\gamma\pi(R^2-r^2)b=0.0078\pi(11.25^2-1.5^2)\times1.2=3.655\ \text{kg}$$

$$I_2=1/2M_2(R^2+r^2)=1/2\times3.655(11.25^2+1.5^2)=235.4\ \text{kgcm}^2$$

3）计算每个圆孔对转轴的转动惯量I_3

圆孔可作为实心圆柱体，其质量M_3为：

$$M_3=\gamma\pi r^2b=0.0078\pi\times2.25^2\times1.2=0.1489\ \text{kg}$$

由表查得实心圆柱体对质心轴的转动惯量，再应用平行移轴公式，可得每个圆孔的转动惯量I_3为：

$$I_3=1/2M_3r^2+M_3R^2=1/2\times0.1489\times2.25^2+0.1489\times8^2=9.907\ \text{kgcm}^2$$

4）计算轮毂的转动惯量I_4

轮毂也是空心圆柱体，其质量M_4和对转轴的转动惯量I_4为：

$$M_4=\gamma\pi(R^2-r^2)b=0.0078\pi(2.6^2-1.5^2)\times4.2=0.464\ \text{kg}$$

$$I_4=1/2M_4(R^2+r^2)=1/2\times0.464(2.6^2+1.5^2)=2.09\ \text{kgcm}^2$$

5）计算整个飞轮对转轴的转动惯量I

$$I=I_1+I_2-4I_3+I_4=3832.16\ \text{kgcm}^2$$

飞轮的回转半径ρ为：

$$\rho=\sqrt{\frac{I}{\mathrm{M}}}=\sqrt{\frac{3832.16}{22.52}}=13\ \text{cm}$$

3.3.3 构件对相交于一点的各轴的转动惯量

1）构件对相交于一点的各轴的转动惯量的关系

构件对通过坐标原点的任意轴L的转动惯量I_L与构件对三个坐标的转动惯量I_x、I_y、I_z的关系式如下：

$$I_L=I_x\cos\alpha^2+I_y\cos\beta^2+I_z\cos\gamma^2-2I_{yz}\cos\beta\cos\gamma-2I_{zx}\cos\gamma\cos\alpha-2I_{xy}\cos\alpha\cos\beta \tag{1.1.1-16}$$

式中，α、β、γ分别为轴L与坐标轴x、y、z轴之间的夹角；I_{xy}、I_{yz}、I_{zx}分别为构件对坐标轴的离心转动惯量，其计算式分别为：

$$I_{xy}=\sum mxy;\quad I_{yz}=\sum myz;\quad I_{zx}=\sum mzx \tag{1.1.1-17}$$

2）构件的惯性主轴和中心惯性主轴

若构件对坐标轴的离心转动惯量I_{xy}，I_{yz}，I_{zx}都等于零，则x、y、z轴就是构件在原点上的惯性主轴，对通过原点的任意轴L的转动惯量I_L的表达式变为：

$$I_L=I_x\cos\alpha^2+I_y\cos\beta^2+I_z\cos\gamma^2 \tag{1.1.1-18}$$

若只有$I_{xy}=0$及$I_{yz}=0$，则y轴是惯性主轴，如：$I_{yz}=0$，$I_{zx}=0$，则z轴为惯性主轴，同样，当$I_{zx}=0$，$I_{xy}=0$，则x轴为惯性主轴。

通过质心的惯性主轴，称为中心惯性主轴，若构件有对称面，则质心必在对称面上，过质心并垂直于对称面的轴，必为中心惯性主轴，若构件有对称轴，则对称轴是中心惯性主轴。

4 构件的运动分析

船舶机械由各种构件组成，它们按照一定规律作机械运动。为了分析各构件的运动规律，一般先将机构的运动分解，并绘制模型简图。分析的方法是：先分别研究构件上任意点的运动，然后综合研究构件的整体运动。

4.1 运动的类型

船舶机械中常见的机构，大多是平面机构，其运动模型简图，可参见表 1.1.1-10。运动的类型及其特征，可参阅表 1.1.1-11。

表 1.1.1-10　　　　　　　　　　　　**机构运动模型简图**

机构名称	结构示意图	机构运动简图
曲柄连杆机构	曲轴 连杆 活塞（滑块） O A B 偏心轮（曲柄） A O B	O A B
曲柄摇杆机构	A B O C	A B O C
导杆机构		导杆 B C A

表 1.1.1-11　　　　　　　　　　　　**平面机构中运动的分类**

分类		运动特征
点的运动	直线运动	点的运动轨迹是直线，如表 1.1.1-10 上曲柄滑块机构中 B 点的运动
	曲线运动	点的运动轨迹是曲线或圆，如表 1.1.1-10 上曲柄滑块机构中 A 点的运动。圆周运动是曲线运动的特殊情况
构件的运动	平行移动（简称平动或平移）	1. 构件上任意一条直线始终作平行于其自身的运动 2. 构件上各点的轨迹都相同，且在同一瞬时各点都具有相同的速度和加速度。如表 1.1.1-10 上曲柄滑块机构中滑块的运动、简谐运动机构中滑块的运动都是平动的实例
	定轴转动	构件绕某一固定轴线作转动，如表 1.1.1-10 上曲柄滑块机构中曲柄的运动；双摇杆机构中摇杆的运动；导杆机构中导杆的运动等
	平面平行运动（简称平面运动）	构件上总有一个平面始终作平行于某一固定平面的运动，如表 1.1.1-10 上各类机构中连杆的运动

4.2 点的运动分析

4.2.1 运动方程、速度和加速度

1)运动方程

点的运动方程形式为

在平面中运动的点：

$$x=x(t);\quad y=y(t) \tag{1.1.1-19}$$

在空间运动的点：

$$x=x(t);\quad y=y(t);\quad z=z(t) \tag{1.1.1-20}$$

从运动方程中消去t后，即可得到点的运动轨迹。

2)速度

点在某一瞬间运动的快慢及方向，用矢量$\vec{v}$表示，其方向沿运动轨迹的切线，并指向运动的前进方向，如已知点沿轨迹运动的路程$S=S(t)$，则速度可通过$v=\frac{ds}{dt}$求得。速度的常用单位为m/s或cm/s。

3)加速度

点在运动时，其速度的变化率，即为点的加速度。加速度也是矢量，常用$\vec{a}$表示，它是速度矢量$\vec{v}$对时间的一阶导数，即$\vec{a}=\frac{d\vec{v}}{dt}$。加速度的常用单位为m/s²或cm/s²。

4.2.2 点的直线运动

1)由运动方程计算速度和加速度

计算公式如下

$$v=\frac{ds}{dt},\quad a=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2s}{dt^2} \tag{1.1.1-21}$$

若速度与加速度方向均与坐标轴相重合，可用代数量表示，方向与轴向一致为正，反之为负。

2)由加速度计算速度及位移

若加速度$a=a(t)$已知，则可由积分法来求出速度及点的位移，其关系式可参阅表1.1.1-12。

表1.1.1-12　**直线运动计算公式**

运动情况	图示	计算公式	说明
匀速运动 ($a=0$或$v=$常数)	O　Mo　M　v　s s_0　s　t	$s=s_0+vt$	s_0——动点M的初始坐标
匀变速运动 ($a=$常数)	O　Mo　M　v　a　s s_0　v_0　s	$s=s_0+v_0t+\frac{1}{2}at^2$ $v=v_0+at$ $v^2=v_0^2+2a(s-s_n)$	1. s_0、v_0为动点M的初始坐标和初速度 2. 当v和a的正、负号相同时（同为正，或同为负），点作加速运动，相反时，作减速运动
一般变速运动 (a为变量)		$s=s_0+\int_0^t vdt$ $v=v_0+\int_0^t adt$	

4.2.3 点的曲线运动

点作空间或平面曲线运动时，一般常用的分析方法为自然法和直角坐标法，其运动要素间的计算公式可见表 1.1.1-13。

表 1.1.1-13　　　　　　　　　　**曲线运动计算公式**

运动表示法		运动方程	速度	加速度	说明
自然法	图示				1. 适用于轨迹已知的情况。列运动方程时，可在轨迹上任选一点 O 为原点，并规定原点的一方为正，另一方为负 2. v、a_t、a_n 都位于密切面内 3. v 和 a_t 为正时，沿轨迹切线的正向；反之，沿轨迹切线的负向 4. a_n 沿主法线，指向曲率中心 C 5. ρ——曲率半径
自然法	公式	$s=s(t)$	$v=\frac{ds}{dt}$	$a=\sqrt{a_t^2+a_n^2}$ $\mathrm{tg}\theta=\frac{a_t}{a_n}$ $a_t=\frac{dv}{dt}$ $a_n=\frac{v^2}{\rho}$	
直角坐标法	图示				1. 固定坐标系 Oxy 选定后，v_x、v_y、v_z，a_x、a_y、a_z 分别表示速度、加速度在坐标轴上的投影 2. 从运动方程组中消去参变量 t 后，可得到轨迹的曲线方程
直角坐标法	公式	$x=x(t)$ $y=y(t)$ $z=z(t)$	$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}$ $v_x=\frac{dx}{dt}$ $v_y=\frac{dy}{dt}$ $v_z=\frac{dz}{dt}$ $\cos\alpha=\frac{v_x}{v}$ $\cos\beta=\frac{v_y}{v}$ $\cos\gamma=\frac{v_z}{v}$	$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}$ $a_x=\frac{dv_x}{dt}$ $a_y=\frac{dv_y}{dt}$ $a_z=\frac{dv_z}{dt}$ $\cos\alpha'=\frac{a_x}{a}$ $\cos\beta'=\frac{a_y}{a}$ $\cos\gamma'=\frac{a_z}{a}$	

表中密切面的定义是：空间曲线的密切面是在曲线上的邻近三个点 M、M_1、M_2、逐渐向 M 点靠近时所组成的极限平面，其上包括曲线在 M 点处的切线及曲线在 M 点处的主法线。

4.3 构件的运动分析

4.3.1 平动

构件作平动时，各点的轨迹相同，速度相同，因而可归结为一个点的运动。

4.3.2 定轴转动

构件绕某一定轴作转动时，整个构件的位置可由转角φ来确定，其变化率用ω来表示，称为角速度，角加速度ε则为角速度ω的变化率。关于构件定轴转动的计算公式，可参阅表 1.1.1-14。

表 1.1.1-14　　**刚体定轴转动的计算公式**

运动情况	特　征	简　图	计 算 公 式	附　注
定轴转动(一般关系式)	刚体转动时，其中位于某一直线(转轴)上的各点始终保持不动		转角$\varphi=f(t)$ 角速度$\omega=\dfrac{d\varphi}{dt}$rad/s 角加速度$\varepsilon=\dfrac{d^2\varphi}{dt^2}$rad/s²	φ逆时针方向为正，反之为负。运动起始条件，即当$t=0$时，$\varphi=\varphi_0$，$\omega=\omega_0$。 当ω、ε的符号相同(同为+或同为−)时，刚体作加速运动；符号相反时，作减速运动 $\omega=\dfrac{2\pi n}{60}$ n——每分钟转速
一般变速定轴转动	$\varepsilon=$变量		$\varepsilon=\dfrac{d\omega}{dt}=\dfrac{d^2\varphi}{dt^2}$ $\omega=\omega_0+\int_0^t\varepsilon dt$ $\varphi=\varphi_0+\int_0^t\omega dt$	
定轴转动时刚体内各点的运动(速度和加速度)	任一点M到转轴的距离为r。 M点作半径为r的圆周运动		速度： $v=\dfrac{ds}{dt}=\dfrac{d(r\varphi)}{dt}=r\dfrac{d\varphi}{dt}=r\omega$ 切向加速度： $a_\tau=\dfrac{dv}{dt}=\dfrac{d(r\omega)}{dt}=r\dfrac{d\omega}{dt}=r\varepsilon$ 法向加速度： $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}=\dfrac{r^2\omega^2}{r}=r\omega^2$ 加速度： $a=\sqrt{a_\tau^2+a_n^2}=r\sqrt{(\varepsilon^2+\omega^4)}$ 加速度的方向： $\mathrm{tg}\alpha=\dfrac{\lvert a_\tau\rvert}{\lvert a_n\rvert}=\dfrac{\lvert\varepsilon\rvert}{\omega^2}$	

4.3.3 平面运动

1)平面运动的分析方法

在直线转道上滚动的车轮上的A点设一平动坐标系$A'x'y'$(见图 1.1.1-14)，运动中始终平行于固定的坐标系oxy。车轮由位置 I 运动到位置 II 时，轮上的直线AB运动到位置$A'B''$，这种运动可分解为两种运动的合成结果，即车轮先随平动坐标$A'x'y'$一起平动，直线AB到达$A'B'$位置；其次，在位置 II 车轮绕A'点转动，直线$A'B'$到达$A'B''$位置。若以

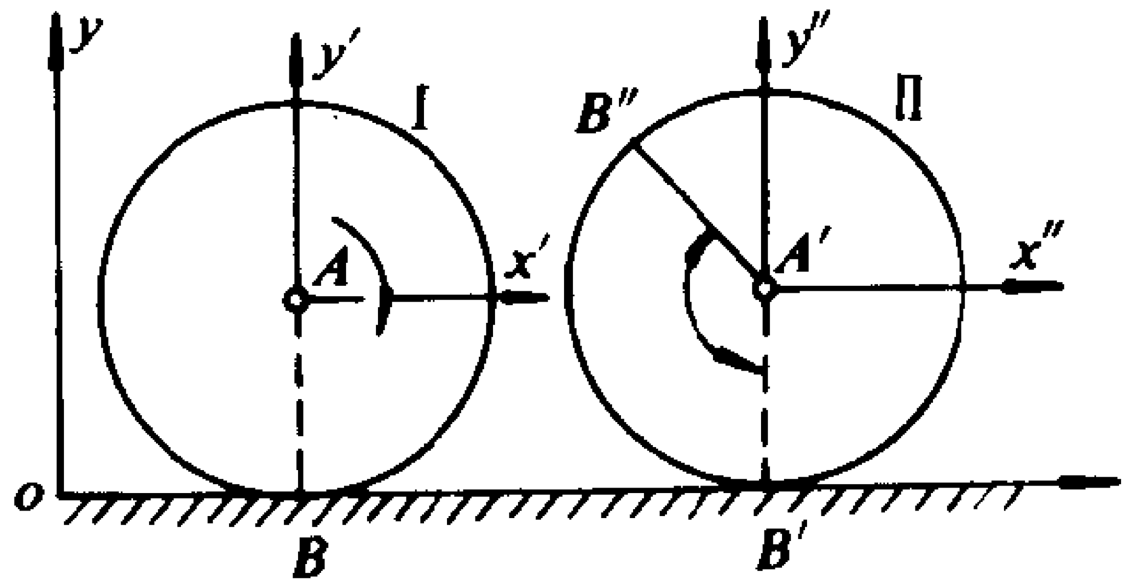


图 1.1.1-14　平面运动分析

平动坐标系$Ax'y'$的原点A为基点，则平面运动可按例中的情况被分解为随基点的平动和绕基点的转动两种运动。基点可以任意选择，因而平动是随基点的选取而变化的，但绕基点的转动则与基点的选择无关，即绕任何基点转动的转角、角速度及角加速度，都是相同的，它们就是构件在作平面运动时的转角、角速度和角加速度。应用点的合成运动的方法，即可得到平面运动构件上任一点的速度和加速度的计算公式。

2)合成法计算速度和加速度

根据上节分析，用合成法计算平面运动构件上各点的速度和加速度的公式，列于下表1.1.1-15中。

表 1.1.1-15　　**用合成法计算速度与加速度的公式**

类别	图　　示	计 算 公 式	说　　明
速		$V_B = V_A + V_{BA}$	V_{BA}——B点相对于A点的速度 $V_{BA}=AB\omega$ ω——构件的角速度
度		$V_A\cos\alpha = V_B\cos\beta$	在同一构件上任两点的速度在此两点连线上的投影相等（速度投影定理）
加速度		$\vec{a}_B=\vec{a}_A+\vec{a}_{BA}$ $=\vec{a}_A+\vec{a}^t_{BA}+\vec{a}^n_{BA}$	$\vec{a}_{BA}$——B点相对于A点的加速度 $\vec{a}^t_{BA}$——B点相对于A点的切向加速度 $\vec{a}^n_{BA}$——B点相对于A点的法向加速度 $a^t_{BA}=AB_\varepsilon$，$a^n_{BA}=AB\omega^2$ ε——构件的角加速度

应用公式时，先在构件上选定基点，然后分析所研究的点的速度和加速度的大小和方向，再应用所列的矢量公式，进行投影计算。

例：图1.1.1-15所示的曲柄摆杆控制机构，曲柄$AB=20$cm，转速$n=50$ r/min，摆杆$CD=40$ cm，求图示位置时连杆BC的角速度ω_{BC}，角加速度ε_{BC}和摆杆CD的角速度ω_{CD}，角加速度ε_{CD}。

解：曲柄AB为定轴转动，摆杆CD也为定轴转动，连杆BC作平面运动，选B点为基点。B、C两点均作圆周运动。

（1）速度分析（如图1.1.1-15中a)所示）

因AB为定轴转动，所以B点的速度为：

$$V_B=\omega_{AB}\cdot AB=\frac{2\pi n}{60}\times 20=104.8\text{ m/s},$$

方向已在图上标明。

C点作圆周运动，$\vec{V}_C$的方向已知，应垂直于CD。根据速度合成公式：

$$\vec{V}_C=\vec{V}_B+\vec{V}_{CB}$$

解这个矢量方程，在x轴上投影得：

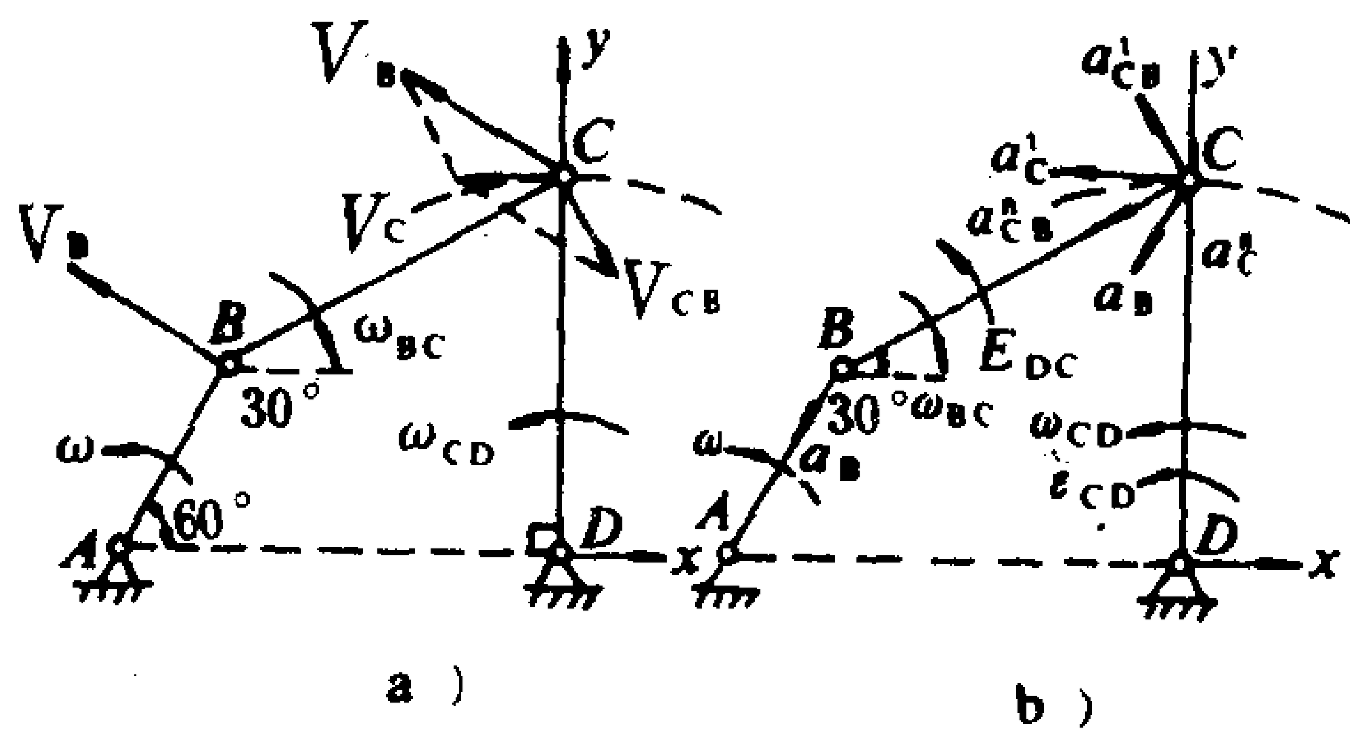


图1.1.1-15　曲柄摆杆机构

$$-V_C=-V_B\cos 30^\circ+V_{CB}\sin 30^\circ$$

在y轴上投影得：

$$0=V_B\sin 30^\circ-V_{CB}\cos 30^\circ$$

解出
$$V_C=V_{CB}=60.4\ \text{m/s}$$

BC杆的角速度$\omega_{BC}=\dfrac{V_{CB}}{BC}=1.33\quad\text{rad/s}$。$CD$杆的角速$\omega_{CD}=\dfrac{V_C}{CD}=1.51\quad\text{rad/s}$。

（2）加速度分析（见图b））

因曲柄AB作匀角速转动，B的加速度为：

$$a_B=a_B^n=AB\omega_{AB}^2=550\ \text{cm/s}^2$$

根据加速度合成公式，C点的加速度为：

$$\vec{a}_C=\vec{a}_B+\vec{a}_{CB}^t+\vec{a}_{CB}^n$$

由于C点同时在CD杆上作圆周运动，所以C点的加速度又可写成

$$\vec{a}_C=\vec{a}_C^t+\vec{a}_C^n$$

得到矢量式

$$\vec{a}_C^t+\vec{a}_C^n=\vec{a}_B+\vec{a}_{CB}^t+\vec{a}_{CB}^n$$

为进行投影计算，现将各加速度的大小和方向排列如下。

大　　小	方　　向
$a_C^t=CD\varepsilon_{CD}$　（未知）	$a_C^t\perp CD$
$a_C^n=CD\omega_{CD}^2=91.4\quad\text{cm/s}^2$	a_C^n沿CD，指向D
$a_{CB}^t=BC\varepsilon_{BC}$　（未知）	$a_{CB}^t\perp BC$
$a_{CB}^n=BC\omega_{BC}^2=80.5\quad\text{cm/s}^2$	a_{CB}^n沿CB，指向B

将矢量方程在x轴上投影可得

$$-a_C^t=-a_B\sin 30^\circ-a_{CB}^t\sin 30^\circ-a_{CB}^n\cos 30^\circ$$

在y轴上投影可得

$$-a_C^n=-a_{BC}\cos 30^\circ+a_{CB}^t\cos 30^\circ-a_{CB}^n\sin 30^\circ$$

联立求解后得出

$$a_{CB}^t=492\ \text{cm/s}^2;\quad a_C^t=591\ \text{cm/s}^2$$

由此得出

$$\varepsilon_{BC}=\frac{a_{CB}^t}{BC}=10.85\ \text{rad/s}^2;\quad \varepsilon_{CD}=\frac{a_C^t}{CD}=14.75\ \text{rad/s}^2$$

3）用瞬心法计算各点的速度

平面运动构件上瞬时速度为零的一点，称为速度瞬心，用P表示。由速度合成法可知，若取速度瞬心为基点，则构件上任一点M的速度，即为，$V_M=MP\cdot\omega$，其方向与PM垂直，并指向构件转动的一方。平面运动构件常用来确定速度瞬心的方法，可查阅表 1.1.1-16。

例：周转轮系增速机构如图所示。曲柄o_1o_2以角速度ω_0绕o_1轴转动，节圆半径为r_2的齿轮II，活动地套在曲柄杆端o_2上，由轴o_2带动在节圆半径为r_3的固定内接齿轮III上滚动，此时齿轮II遂带动节圆半径为r_1并活动地套在曲柄o_1上的齿轮 I 转动。若已知固定内接齿轮III与齿轮 I 的节圆半径之比$r_3/r_1=11$，曲柄转速是$n_0=1470$ r/min，求齿轮 I 的转速。

表 1.1.1-16　　确定速度瞬心位置的方法

已　知　条　件	图　　示	确　定　方　法
构件上A点速度V_A的大小与方向和构件角速度ω的大小与方向		将V_A顺ω方向转90°作一直线，速度瞬心P在此直线上，且 $AP=\frac{V_A}{\omega}$
A、B两点速度V_A、V_B的方向		过A、B点分别作V_A、V_B的垂线，其交点就是速度瞬心P
A、B两点的速度V_A与V_B平行，但不垂直于A、B两点的连线		速度瞬心P在无穷远处，此时构件作瞬时平动，构件的角速度等于零
A、B两点的速度V_A、V_B的大小，且两者平行，并垂直于AB连线		A、B两点速度端点的连线与AB直线的交点P就是速度瞬心
构件沿固定面作无滑滚动		构件与固定面接触点就是速度瞬心P

解：曲柄o_1o_2，齿轮Ⅰ，分别绕o_1轴作定轴转动；齿轮Ⅱ作平面运动，与内接固定齿轮Ⅲ的接触点C为其速度瞬心；o_2是曲柄o_1o_2上的一点，由此可得：

$$V_{02}=o_1o_2\cdot\omega_2=(r_1+r_2)\omega_0$$

C为轮Ⅱ之瞬心，由V_{02}可求得Ⅱ之角速度

$$\omega_2=\frac{V_{02}}{r_2}=\frac{r_1+r_2}{r_2}\omega_0$$

齿轮Ⅰ与齿轮Ⅱ接触点A处的速度是相同的，由齿轮Ⅱ得：

$$V_A=\omega_2\cdot 2r_2=2(r_1+r_2)\omega_0$$

由齿轮Ⅰ可得

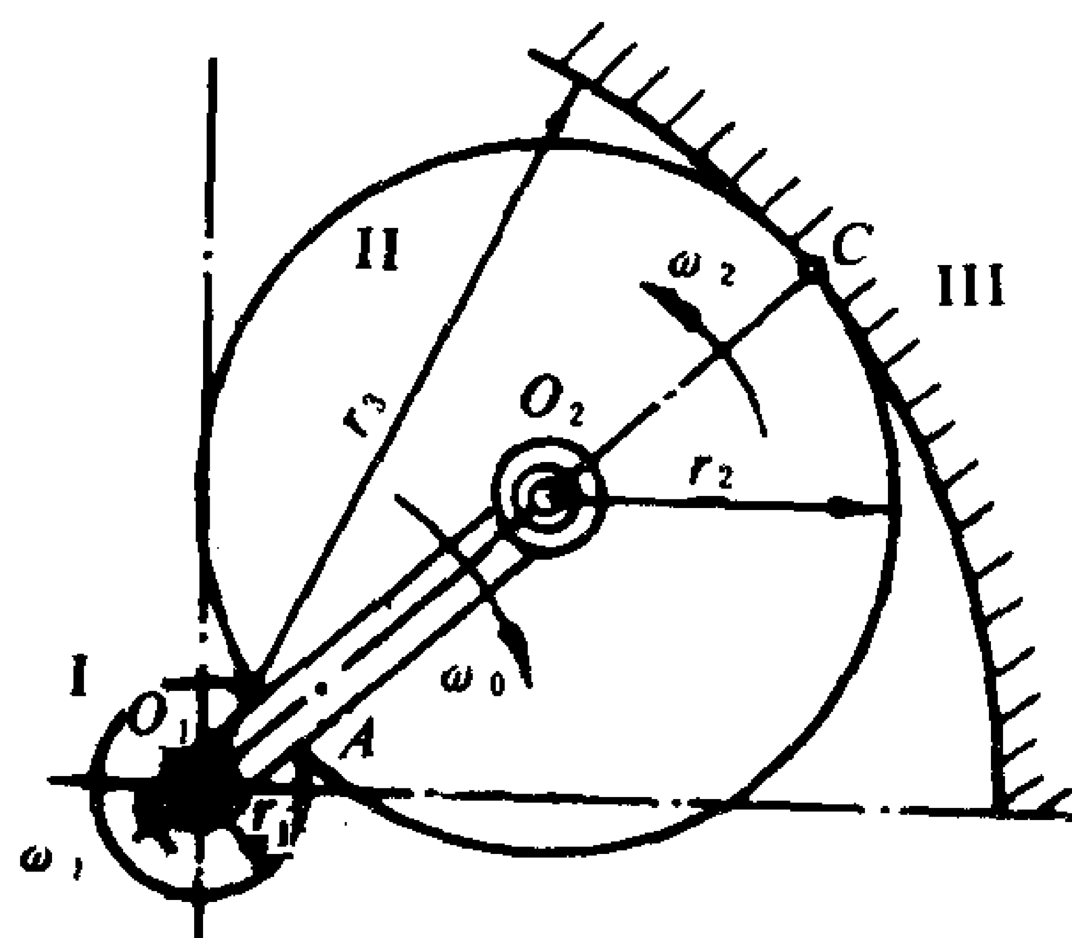


图 1.1.1-16　周转轮系

$$\omega_1=\frac{V_A}{r_1}=\frac{2(r_1+r_2)}{r_1}\omega_0$$

将$r_1+2r_2=r_3$，代入上式，并得出传动比为：

$$i_{10}=\frac{\omega_1}{\omega_0}=\frac{n_1}{n_0}=\frac{2(r_1+r_2)}{r_1}=1+\frac{r_3}{r_1}$$

已知：$\frac{r_3}{r_1}=11$，$n_0=1470$ r/min，可求得$n_1=17650$ r/min。

4.4 点的合成运动

4.4.1 运动的合成与分解

分析物体的运动时，除了固定的参考坐标$oxyz$之外，还可引入一个相对于固定坐标$oxyz$运动的动坐标$o'x'y'z'$。在研究一个动点M的运动时，通常包括它相对于动坐标$o'x'y'z'$的运动，相对于固定坐标系$oxyz$的运动，以及动坐标系$o'x'y'z'$相对于固定坐标系$oxyz$的运动。为了用运动合成与分解的方法来分析点的运动，必须先建立下述的一些概念。

1）绝对运动

动点相对于固定坐标系$oxyz$（一般是与地面固接的）的运动称为绝对运动；相对于固定坐标系的速度和加速度，称为绝对速度$\overrightarrow{V}_a$，及绝对加速度$\overrightarrow{a}_a$。

2）相对运动

动点相对于动坐标系$o'x'y'z'$（一般固定在运动着的构件上）的运动称为相对运动；相对于动坐标系的速度和加速度，称为相对速度$\overrightarrow{V}_r$，及相对加速度$\overrightarrow{a}_r$

3）牵连运动

动坐标$o'x'y'z'$相对于固定坐标系$oxyz$的运动，称为牵连运动。当动点在动坐标系$o'x'y'z'$中运动时，每一瞬时，均在动坐标系中占据一个位置，即每一瞬时，动坐标系上总有一个与动点相重合的点，此点的速度与加速度即定义为动点在该瞬时的牵连速度$\overrightarrow{V}_e$和牵连加速度$\overrightarrow{a}_e$。

4.4.2 速度合成定理与加速度合成定理

1）速度合成定理与加速度合成定理

在选定了两种坐标系之后，分别按定义确定动点的三种速度、加速度的大小和方向。随后，即可分别按速度和加速度合成定理进行计算。

速度合成定理：

$$\overrightarrow{V}_a=\overrightarrow{V}_e+\overrightarrow{V}_r \tag{1.1.1-22}$$

加速度合成定理：

牵连运动为平动时：

$$\overrightarrow{a}_a=\overrightarrow{a}_e+\overrightarrow{a}_r \tag{1.1.1-23}$$

牵连运动为定轴转动时：

$$\overrightarrow{a}_a=\overrightarrow{a}_e+\overrightarrow{a}_r+\overrightarrow{a}_k \tag{1.1.1-24}$$

2）哥氏加速度$\overrightarrow{a}_k$的大小和方向

当动坐标所在的构件作定轴转动时，由于牵连运动和相对运动间的相互影响，在加速度合成公式中有一附加项$\overrightarrow{a}_k$，称为哥氏加速度，其表达式为$\overrightarrow{a}_k=2\,\overrightarrow{\omega}_e\times\overrightarrow{V}_r$，是个矢量乘积，其中$\overrightarrow{\omega}_e$为动坐标$o'x'y'z'$（作定轴转动）的角速度。一些具体求法的例子，列于表 1.1.1-17 中。

表 1.1.1-17 a_k的大小和方向

运动情况	图示	a_k的大小	a_k的方向
v_r与转轴的夹角θ为任意值		$a_k=2\omega_e v_r \sin\theta$	将v_r投影到与转轴相垂直的平面上，得v_r'，再将v_r'顺ω_e转 90°，就是a_k的方向
v_r与转轴相垂直（$\theta=90°$）		$a_k=2\omega_e v_r$	将v_r顺ω_e转 90°，就是a_k的方向
v_r与转轴相平行（$\theta=0°$或$\theta=180°$）		$a_k=0$	

例：直线式气道压缩机的叶轮以匀角速，$n=120$ r/min绕垂直图面的o轴转动；空气以速度$\vec{V}_r=2$ m/s沿气道流动，如图 1.1.1-17 所示。已知气道AB与半径的倾斜角$\alpha=45°$，$OC=0.5$ m，求气道C点处空气分子的绝对速度$\vec{V}_a$及绝对加速度$\vec{a}_a$。

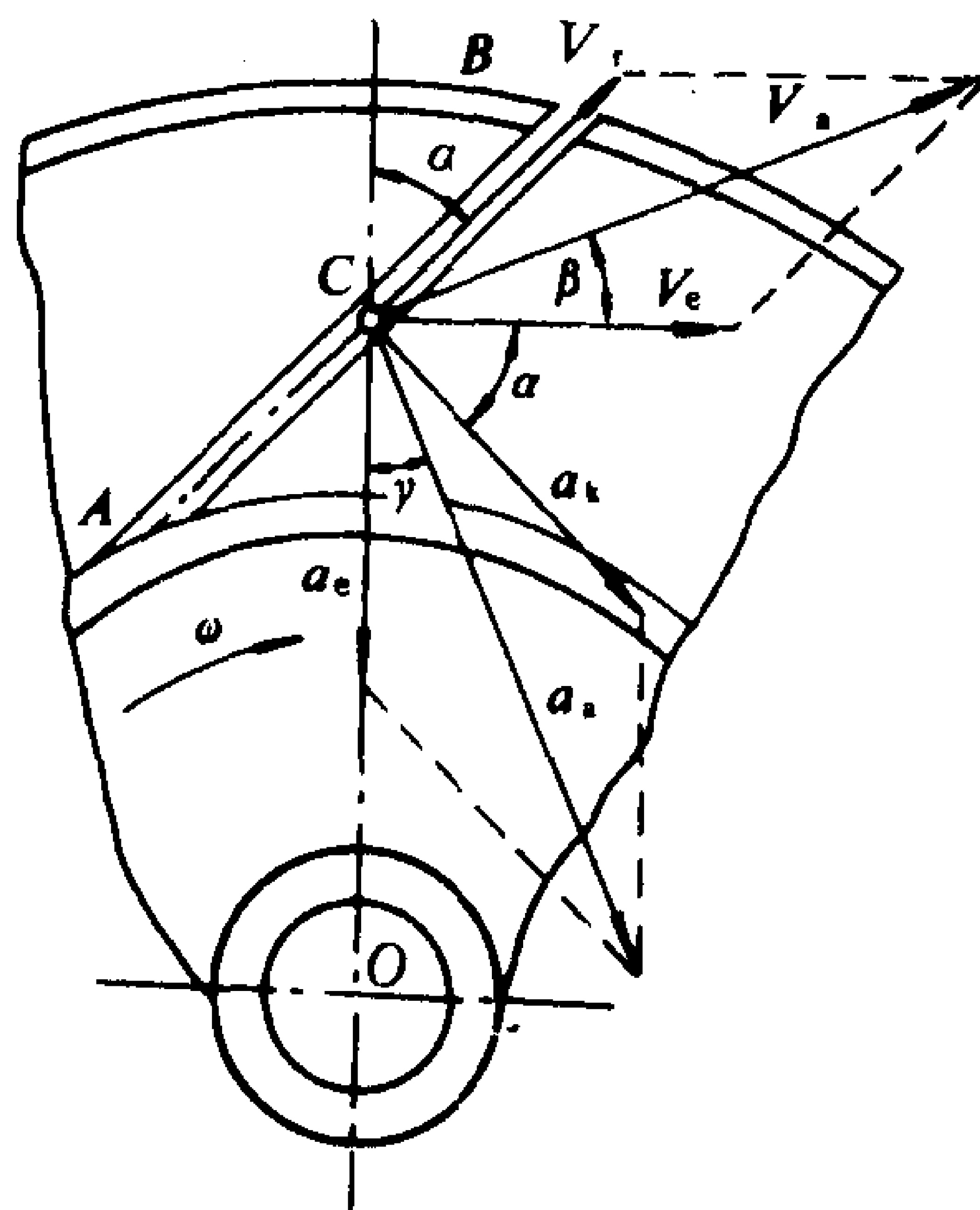


图 1.1.1-17 叶轮

解：取气体分子为动点，动坐标系固定于转动的叶轮上，定坐标系固定在机座上。

经运动分析可得，动点的相对运动是沿气道AB的直线运动，牵连运动是叶轮的定轴转动，绝对运动为两种运动的合成。

应用速度合成定理：

$$\vec{V}_a=\vec{V}_e+\vec{V}_r \quad \text{（见图示方向）}$$

式中，$V_r=2$ m/s；$V_e=OC\cdot\omega=\dfrac{120\times2\pi}{60}\times0.5=6.28$ m/s

用矢量合成法得：　$V_a=7.82\ \mathrm{m/s}$；$\beta=10°26'$

应用加速度合成定理

$$\vec{a}_a=\vec{a}_e+\vec{a}_r+\vec{a}_k \quad （方向见图示）$$

式中，$a_r=0$（匀速直线运动），$a_e=oc\cdot\omega^2=78.5\ \mathrm{m/s}$

$$a_k=2\omega V_r=50.3\ \mathrm{m/s^2}$$

用矢量合成法得：$a_a=119\ \mathrm{m/s^2}$，$\gamma=18°18'$。

5　构件的动力分析

5.1　质点、质点系

1)质点　具有一定质量的几何点。

2)质点系　相互之间有一定联系的一群质点。如忽略变形，则构件可视为各质点间距离保持不变的质点系，即刚体，这是质点系的一种特例。

5.1.1　质点的运动定律（牛顿第二定律）

质点受到外力作用时，质点所获得的加速度$\vec{a}$的大小和合外力$\vec{R}$的大小成正比，并和质点的质量m成反比，加速度的方向和合外力的方向一致。其数学表达式为

$$m\vec{a}=\sum\vec{F}=\vec{R} \tag{1.1.1-25}$$

在具体计算质点运动时，须将矢量式投影成下列运动微分方程

直角坐标系

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=\sum F_x$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2}=\sum F_y \tag{1.1.1-26}$$

$$m\frac{d^2z}{dt^2}=\sum F_z$$

自然坐标系

$$m\frac{dv}{dt}=\sum F_\tau$$

$$m\frac{v^2}{\rho}=\sum F_n \tag{1.1.1-27}$$

质量是质点惯性大小的量度，在地球表面上，质量与重量的关系为$m=\frac{W}{g}$，g为质点的重力加速度，随其在地球上的位置不同而异，工程上常取近似值$g=9.8\ \mathrm{m/s^2}$。

5.1.2　质心运动定理

质点系质心的运动规律具有与质点运动相似的形式：

$$M\vec{a}_c=\sum\vec{F}=\vec{R} \tag{1.1.1-28}$$

或

$$\begin{cases}Ma_{cx}=\sum F_x\\ Ma_{cy}=\sum F_y\\ Ma_{cz}=\sum F_z\end{cases} \tag{1.1.1-29}$$

式中：M——质点系的总质量；

a_c——质点系质心C的加速度；

$\vec{R}=\sum\vec{F}$——作用在质点系上所有外力的主矢。

5.1.3 定轴转动构件的转动方程（转动定理）

构件作定轴转动时，在转动构件上所有的外力，对转动轴Z的力矩的代数和，等于构件对转轴的转动惯量I_z与其角加速度ε的乘积，即

$$I_z\varepsilon=\sum m_z(\vec{F}) \tag{1.1.1-30}$$

例：为了测定内燃机连杆的转动惯量，可用图示的方法，将连杆的小头挂在支点o上，如图 1.1.1-18 中a）所示，使其作微幅摆动（φ角一般要求$\leq 6°$。）已知质心c到转轴的距离为a，分析连杆的转动规律，即可算出连杆对转轴的转动惯量I_z。

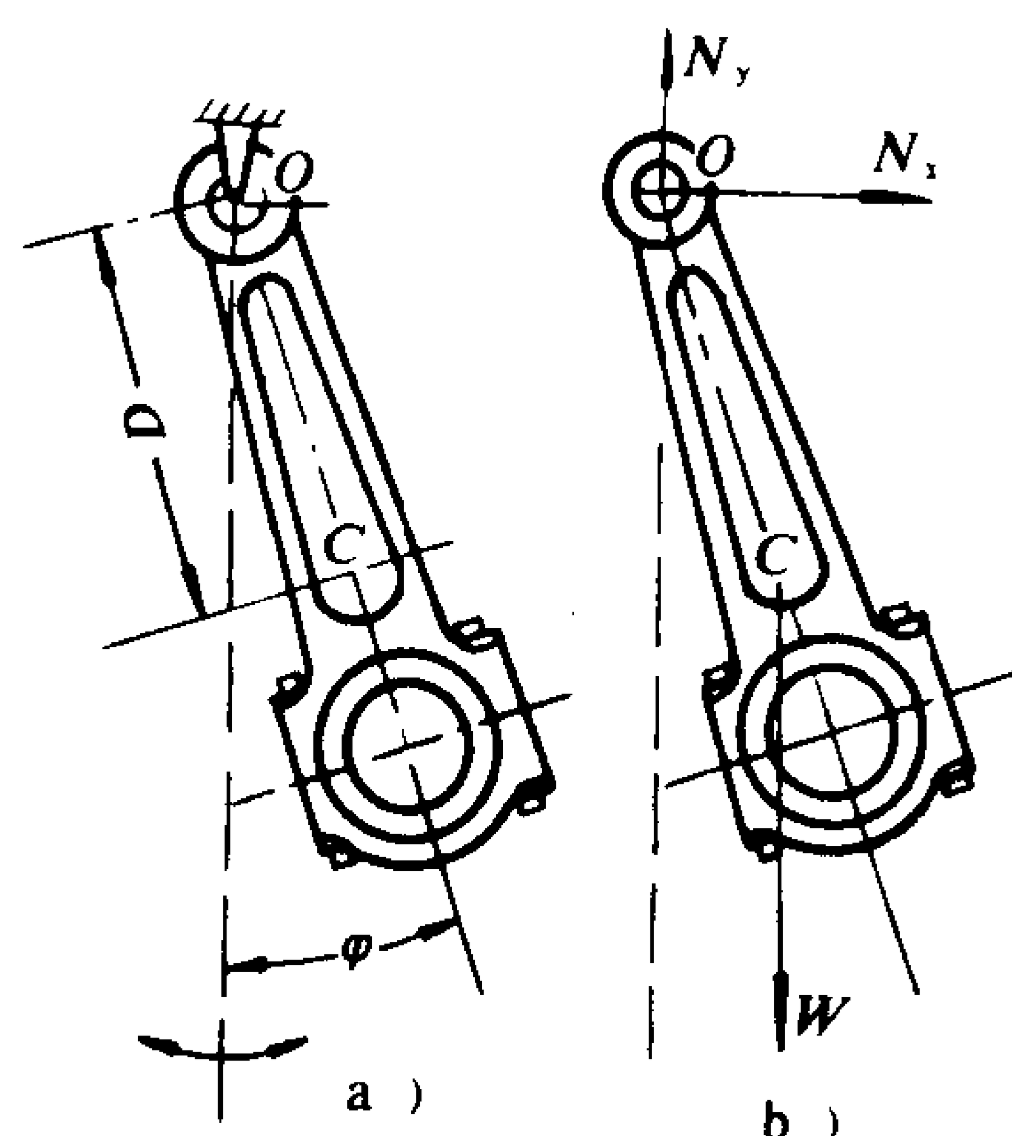


图 1.1.1-18 转动惯量测定

解：连杆受重力W及约束反力N_x, N_y的作用，如图 1.1.1-18 中b）所示。设任意瞬时连杆的转角为φ（逆时针方向为正）。由转动定理：

$$I_z\varepsilon=\sum m(\vec{F})$$

可得

$$I_z\frac{d^2\varphi}{dt^2}=-Wa\sin\varphi$$

因为φ角很小，所以可取$\sin\varphi\approx\varphi$，上式简化为

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2}+\frac{W}{I}a\cdot\varphi=0$$

其解为

$$\varphi=A\sin(\omega_n t+\alpha)$$

上式为简谐运动方程，其中$\omega_n=\sqrt{\frac{Wa}{I_z}}$，$A$为振幅，$\alpha$为初位相，均为积分常数，可由连杆摆动的初始条件确定。ω_n为运动的圆频率，它与周期T的关系为：

$$T=\frac{2\pi}{\omega_n}=2\pi\sqrt{\frac{I_z}{Wa}}$$

测定连杆微幅摆动的周期T以后，即可得到连杆绕转动轴Z的转动惯量I_z为：

$$I_z=\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 Wa$$

5.2 动静法

5.2.1 惯性力及惯性力系的简化

1）惯性力

质点惯性力$\vec{F}_g$的大小和方向，由下式决定：

$$\vec{F}_g=-m\vec{a} \tag{1.1.1-31}$$

式中：m——质点的质量，kg；

$\vec{a}$——质点的加速度，m/s^2。

其中“－”号表示力$\vec{F}_g$与加速度$\vec{a}$的方向相反。

2)惯性力系的简化

将构件上各质点的惯性力按第二节中所述方法简化。选定简化中心o点后，可简化为主矢$\vec{R}_{go}$及主矩$\vec{M}_{go}$，分别为：

$$
\begin{aligned}
\vec{R}_{go} &= \sum \vec{F}_g = -\vec{M}a_c \\
\vec{M}_{go} &= \sum \vec{m}_o(\vec{F}_g)
\end{aligned}
\tag{1.1.1-32}
$$

其中主矢$\vec{R}_{go}$与简化中心o点的选择无关，等于质点系的总质量M与质心加速度$\vec{a}_c$的乘积并反向，主矩$\vec{M}_{go}$则随简化中心o点的不同而异。

对于作平动，定轴转动和平面运动的构件，其惯性力系简化的结果，可参阅表 1.1.1-18。

表 1.1.1-18　　**构件惯性力系的简化结果**

构件转动类别	图示	简化结果		符号说明
		主矢	主矩	
平动	向质心C简化	$R_{gc}=-Ma_c$	$M_{gc}=0$	M——构件质量 a_c——构件质心C的加速度 I_o——构件对转动轴O的转动惯量 I_c——构件对垂直于图示平面的质心轴的转动惯量 ε——构件的角加速度
绕惯性主轴转动	向轴心O简化	$R_{go}=-Ma_c$	$M_{go}=-I_o\varepsilon$	
绕惯性主轴转动	向质心C简化	$R_{gc}=-Ma_c$	$M_{gc}=-I_c\varepsilon$	
平面运动	向质心C简化	$R_{gc}=-Ma_c$	$M_{gc}=-I\varepsilon$	

注：图示平面为运动构件的对称平面。

5.2.2 动静法

质量为m的质点，在某瞬时受主动力及约束反力的作用，具有加速度$\vec{a}$，其运动规律为：

$$\vec{F}+\vec{N}=m\vec{a}$$

上式可改写为如下形式：

$$\vec{F}+\vec{N}+(-m\vec{a})=0 \qquad (1.1.1\text{-}33)$$

对某一瞬间运动中的质点，假想地加上它的惯性力，可与原来作用在其上的主动力和约束反力组成平衡力系，因而可用静力平衡方法来对构件进行运动分析，称为动静法。

用动静法对运动构件进行分析时，可先将构件上的惯性力系简化成一个主矢$\vec{R}_g$和一个主矩$\vec{M}_g$。如图 1.1.1-19 所示，叶轮安装在轴AB中间，其质量为m，质心的偏心量为e。当叶轮以匀角速度ω转动时，质心的法向加速度为$a_n=e\omega^2$，由表查得，整个叶轮惯性力的大小为：

$$R_g=me\omega^2$$

方向与a_n相反，如图 1.1.1-19 所示。

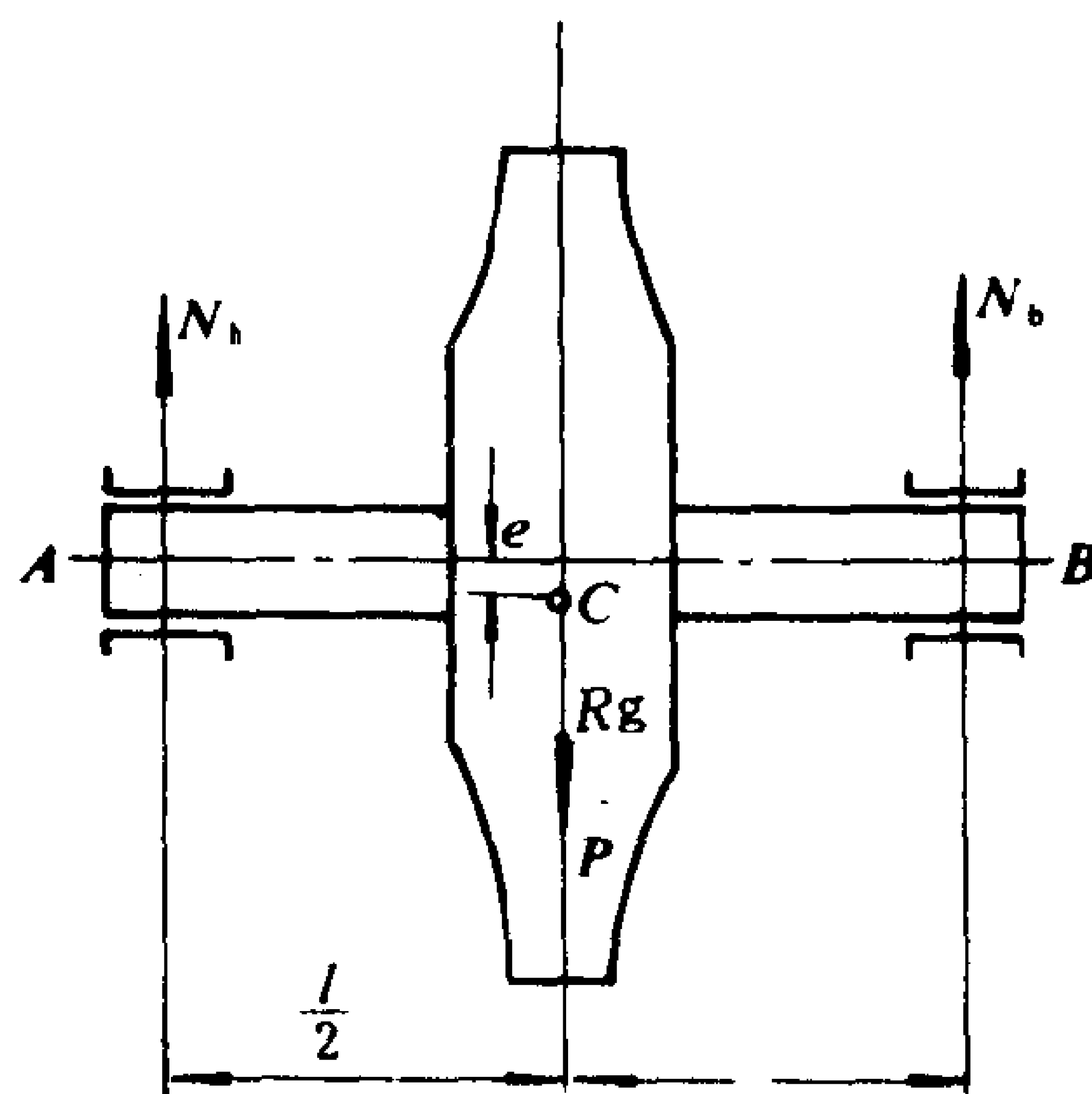


图 1.1.1-19　动静法图示

应用动静法求轴承的支反力$\vec{N}_A$和$\vec{N}_B$时，按平面任意力系的平衡方程可得：

$$\Sigma F_y=0,\quad N_A+N_B-mg-R_g=0$$

$$\Sigma M_B(\vec{F})=0,\quad -N_A l+mg\ l/2+R_g\ l/2=0$$

解得：

$$N_A=N_B=mg/2+me\omega^2/2$$

可见轴承支反力由两部分组成，第一部分直接由重力$P=mg$引起，称为静反力；第二部分由叶轮惯性力引起，它与角速度ω的平方成正比，称为动反力。若叶轮质量$m=50$ kg，偏心量$e=0.02$ mm转速$n=12000$ r/min，可得：

$$N_A=N_B=754\ \text{N}$$

其中，静反力$N'_A=N'_B=254$ N；动反力$N''_A=N''_B=500$ N由上例可见，在高速旋转机械中，很小的偏心量，能引起很大的动反力。

为消除偏心量e引起的动反力，可采用静平衡方法来调整转子质心的位置，使偏心量e尽量地小，如能使$e=0$，就消除了动反力。静平衡方法的原理如图 1.1.1-20 所示。把转盘放在水平刀口支承上，让转盘自由滚动，

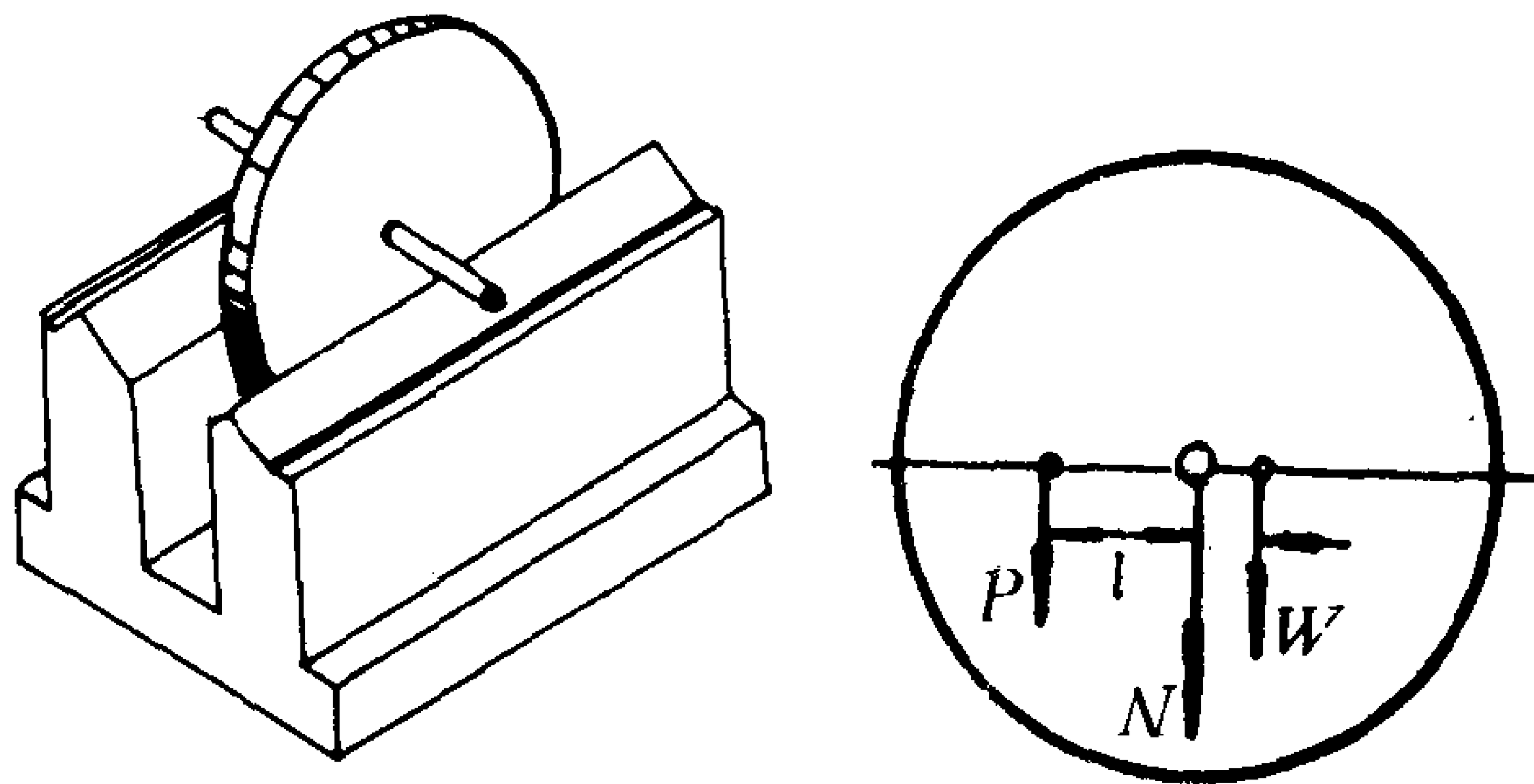


图 1.1.1-20　静平衡法

如转盘不平衡，它的重边总在下面；把校正用的附加重量，加在转盘轻边上，达到随遇平衡，再将校正重量换成固定重量，或在重边方向的对称位置去掉相同的重量，使调整后的转子，

不再偏心，就完成了静平衡。

如转子轴向尺寸较大，或转速很高，即使进行了静平衡，仍然可能产生较大的动反力，这就必须在专门的动平衡机上进行动平衡。有关动平衡的原理和仪器，可参阅专门的资料。

5.3 功与动能

当机械运动转化成其它形式的运动如热运动、电运动时，必须应用功和能量的概念来度量所转化的机械运动量。

5.3.1 功和功率

1)功　力所作的功与力的大小、方向及力的作用点的位移有关，它等于力在位移方向上的投影与位移乘积的积分，单位为N·m，或kN·m。常见的力所作的功的计算公式可参阅表1.1.1-19。

表1.1.1-19　　几种常见力所作功的计算公式

图示	功W的计算公式（由A到B）kN·mm	说明
	$W=\int_{S_a}^{S_b}F\cos\alpha ds=\int_{(x_a,y_a,z_a)}^{(x_b,y_b,z_b)}(F_x dx+F_y dy+F_z dz)$	1. S_A，S_B——A、B两点的弧坐标 2. (x_A，y_A，z_A)，(x_B，y_B，z_B)——A、B两点的直角坐标， 3. F_x, F_y, F_z——力在x, y, z轴上的投影
	$W=G(h_A-h_B)$	1. (h_A-h_B)是物体质心在始末两位置的高度差 2. 重力的功仅与两位置的高度差有关，而与它所经过的路径无关
	$W=\frac{1}{2}K(\lambda_A^2-\lambda_B^2)$	1. K——弹簧的刚度　kN/cm 2. λ——弹簧的伸长或压缩量 3. l_0——弹簧的原长 4. 弹性力的功仅与弹簧在始末位置时的伸长或压缩量(λ_A, λ_B)有关，而与所经过的路径无关
	$W=M(\phi_B-\phi_A)$	1. M——转矩（常力矩或常力偶矩） 2. 转矩与角位移同向，功为正值，反之，功为负值

2)功率与效率

（1）功率　单位时间内力所作的功称为功率。功率通常用符号N表示，功率的常用单位及计算公式，可参阅表 1.1.1-20。

表 1.1.1-20　**功率单位及计算公式表**

功率单位	功率计算公式	
	构件作平动	杆件作定轴转动
牛顿·米/秒 N·m/s	$N=FV\cos\alpha$	$N=M\omega$
马力 P·S	$\frac{FV\cos\alpha}{735}$	$N=\frac{Mn}{7019}$
千瓦 k·W	$\frac{FV\cos\alpha}{1000}$	$N=\frac{Mn}{9549}$

表内式中：F——力，N；　V——速度，m/s；

M——力矩，N·m；　ω——角速度，1/s；

n——转速，1/min；　α——$\vec{F}$与$\vec{V}$间的夹角。

（2）效率　有用功率（输出功率）与输入功率之比称为机器的效率。工程上常用这个指标来评定机器的传动性能。效率的常用符号为η，其计算公式为：

$$\eta=\frac{N_\omega}{N_\varepsilon}\tag{1.1.1-34}$$

式中：N_ε——输入功率，$N_\varepsilon=N_\omega+N_f$；

N_ω——克服工作阻力所需功率，即输出功率；

N_f——克服摩擦阻力所消耗的功率。

5.3.2　动能及动能定理

1）动能　动能是构件作运动时所具有的能量，常用符号T表示，其单位为N·m，或kN·m。动能总是正值。质点、质点系和构件的动能表达式，可参阅表 1.1.1-21。

表 1.1.1-21　**动能计算公式表**

类别	计算公式
质点	$T=\frac{1}{2}mv^2$
质点系	$T=\Sigma\frac{1}{2}mv^2$
平动构件	$T=\frac{1}{2}Mv^2$
定轴转动构件	$T=\frac{1}{2}I\omega^2$
平面运动构件	$T=\frac{1}{2}Mv_c^2+\frac{1}{2}I_c\omega^2$

表内式中：m——质点的质量；

M——构件的质量；

v——质点或平动构件的速度；

v_c——构件质心c的速度；

I——构件绕转动轴的转动惯性；

I_c——构件绕质心轴的转动惯量；

ω——构件的角速度。

2）动能定理　构件（质点系）的总动能变化，等于作用在构件（质点系）上所有力在此变化过程中所作功的总和。其数学形式为：

$$T-T_0=\sum W\tag{1.1.1-35}$$

式中：T_0，T——构件（质点系）处于始、末两位置所具有的动能；

$\sum W$——作用在构件（质点系）上所有力作功的总和。

例：冲压机飞轮如图 1.1.1-21 所示。在一次冲压过程中，转速由$\omega_1=41$ 1/s降至$\omega_2=36.2$ 1/s。在冲压过程中工作阻力的功$W=102$ kN·m；摩擦耗损的功$W_2=5.1$ kN·m；电机输入的功为$W_3=32$ kN·m。已知飞轮外径$D=1250$ mm，宽度$B=300$ mm，试确定飞轮的内径d。

解：用动能定理确定飞轮的转动惯量，再由转动惯量来确定飞轮的尺寸。

由动能定理：$T-T_0=\sum\omega$

可得 $\frac{1}{2}I\omega_2^2-\frac{1}{2}I\omega_1^2=W_3-W_2-W_1$

解出：

$$I=\frac{2(\omega_3-\omega_2-\omega_1)}{\omega_2^2-\omega_1^2}=0.405\ \text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$$

飞轮由铸铁制成，其比重为$r=0.0706$ N/cm^3，略去轮毂的重量，可近似地视飞轮为空心圆柱体，参阅第3节关于转动惯量的计算公式可得：

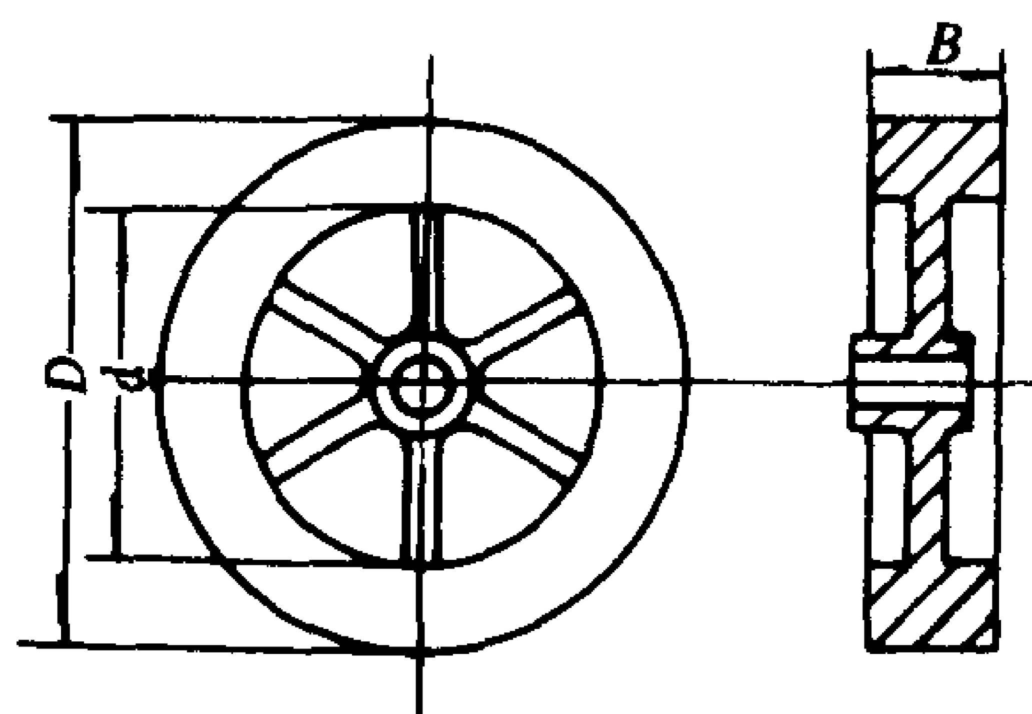


图1.1.1-21 飞轮

$$I=\frac{1}{2}M(R^2+r^2)$$

解出：

$$d=\sqrt[4]{D^4-\frac{32gI}{r\pi B}}=85.4\ \text{cm}$$

5.4 动量与动量矩

5.4.1 动量和动量矩

动量和动量矩，一般常用作机械运动量的量度。动量常用符号为$\vec{P}$，单位为N·s或kN·s。动量矩常用符号为$\vec{G}$，单位为N·s·cm或kN·s·cm。关于它们的定义以及质点、质点系和构件在各种运动情况下的表达式，可参阅表1.1.1-22。

表1.1.1-22 **动量、动量矩的计算公式**

类别	动量	动量矩	
		对固定轴$Z(G_z)$	对通过质心的轴$Z_c(G_{zc})$
质点	$\vec{P}=m\vec{V}$	$G_z=m_z(m\vec{V})=xmV_y-ymV_z$	
质点系	$\vec{P}=\sum m\vec{V}=M\vec{V}_c$	$G_z=\sum m_z(m\vec{V})$	$G_{zc}=\sum m_{zc}(m\vec{V})$
平动构件	$\vec{P}=M\vec{V}_c$	$G_z=x_cMV_{cy}-y_cMV_{cx}$	$G_{zc}=0$
定轴转动构件		$G_z=I_z\omega$	$G_{zc}=I_{zc}\omega$
平面运动构件		$G_z=G_{zc}+x_cMV_{cy}-y_cMV_{cx}$	$G_{zc}=I_{zc}\omega$

表内式中，$m\vec{V}$——质点的动量；$m_z(m\vec{V})$——质点对Z轴的动量矩；m——质点的质量；M——质点系或构件的总质量；I_z，I_{zc}——构件对Z轴，Z_c轴的转动惯量；x、y、x_c、y_c——质点与质心C的坐标；$\vec{V}$、V_x、V_y——质点的速度及其在x、y轴上投影。$\vec{V}_c$、V_{cx}、V_{cy}——质心速度及其在x、y轴上的投影。

5.4.2 动量定理与动量矩定理

1)动量定理　质点系动量定理的数学表达式为：

$$\frac{d\vec{P}}{dt}=\sum\vec{F} \qquad (1.1.1\text{-}36)$$

当$\sum\vec{F}=0$时，$\vec{P}=$常量或$\vec{V}_c=$常量，称为动量守恒。当$\sum F_x=0$时，$P_x=$常量或$V_{cx}=$常量，

表示动量沿x轴方向守恒。

2）动量矩定理　质点系的动量矩定理，可分为对固定轴的动量矩定理和对质心C的动量矩定理，数学表达式分别为：

对固定轴Z的动量矩定理：

$$\frac{dG_z}{dt}=\sum m_z(\vec{F}) \tag{1.1.1-37}$$

通过质心C轴Z_c的动量矩定理：

$$\frac{dG_{zc}}{dt}=\sum m_{zc}(\vec{F}) \tag{1.1.1-38}$$

当　$\sum m_z(\vec{F})=0$ 时，$G_z=$常量；

$\sum m_{zc}(\vec{F})=0$ 时，$G_{zc}=$常量；均为守恒状态。

5.5　碰撞问题

5.5.1　碰撞现象

两个运动物体撞击时，由于物体的动量在极短的时间内发生显著的变化，因此物体相互之间产生很大的碰撞力。研究碰撞力时，常作如下几个假定。

1）碰撞过程中，与碰撞力相比，其它作用力，如重力、摩擦力等，可以略去不计；

2）碰撞过程中，各质点的位移可以略去不计。

所以，在碰撞过程中，动量定理具有如下形式：

$$d\vec{P}=\vec{F}dt \tag{1.1.1-39}$$

式中，$\vec{F}$为撞击力(其它力略去不计)。应用时可用积分形式：$\vec{S}=\int_0^t\vec{F}dt$。$\vec{S}$称为碰撞冲量，是个有限量。

5.5.2　恢复系数k及碰撞的三种类型

通过两球的对心正碰撞的研究，可得出碰撞的三种类型。取两球碰撞前的速度分别为V_1和V_2，碰撞后的速度分别为u_1和u_2，可得两球碰撞后的相对速度与碰撞前的相对速度之比：

$$K=\frac{u_2-u_1}{V_1-V_2} \tag{1.1.1-40}$$

1）若碰撞后两球不再分开，即$u_1=u_2=u$，则可得$K=0$，称为塑性碰撞；

2）若碰撞前后，相对速度相等，即可得$K=1$，称为完全弹性碰撞；

3）一般情况下，$0<K<1$，称为弹性碰撞。

K为碰撞的恢复系数，它与碰撞物体的材料有关，其数值可通过实验求出，下面列出几种材料的恢复系数：

橡皮：8/9；钢：5/9；玻璃：15/16；木块：1/2，

5.5.3　碰撞过程中的动量和动量矩定理

1）碰撞过程中的动量定理　质量为m的质点，在碰撞冲量$\vec{S}$的作用下，速度自$\vec{V}$变化为$\vec{u}$，由动量定理可得：

$$m\vec{u}-m\vec{V}=\vec{S} \tag{1.1.1-41}$$

推广到质点系，可得：

$$\sum m\vec{u}-\sum m\vec{V}=\sum S_e; \tag{1.1.1-42}$$

式中：$\vec{S}_e$——质点系的外碰撞冲量。

用系统质心C的速度来表示动量，可得：

$$Mu_C-MV_C=\sum S_e \tag{1.1.1-43}$$

2)碰撞过程中的动量矩定理　由于忽略了碰撞过程中的位移，可得质点m对轴Z的动量矩定理为：

$$m_z(m\vec{u})-m_z(m\vec{V})=m_z(\vec{S}) \tag{1.1.1-44}$$

推广到质点系可得：

$$\sum m_z(m\vec{u})-\sum m_z(m\vec{v})=\sum m_z(\vec{S}) \tag{1.1.1-45}$$

对于定轴转动的刚体，角速度由碰撞前的ω_p变为碰撞后的ω。应用动量矩定理，可得：

$$I_z(\omega-\omega_0)=\sum m_z(\vec{S}_e) \tag{1.1.1-46}$$

5.5.4　碰撞中心

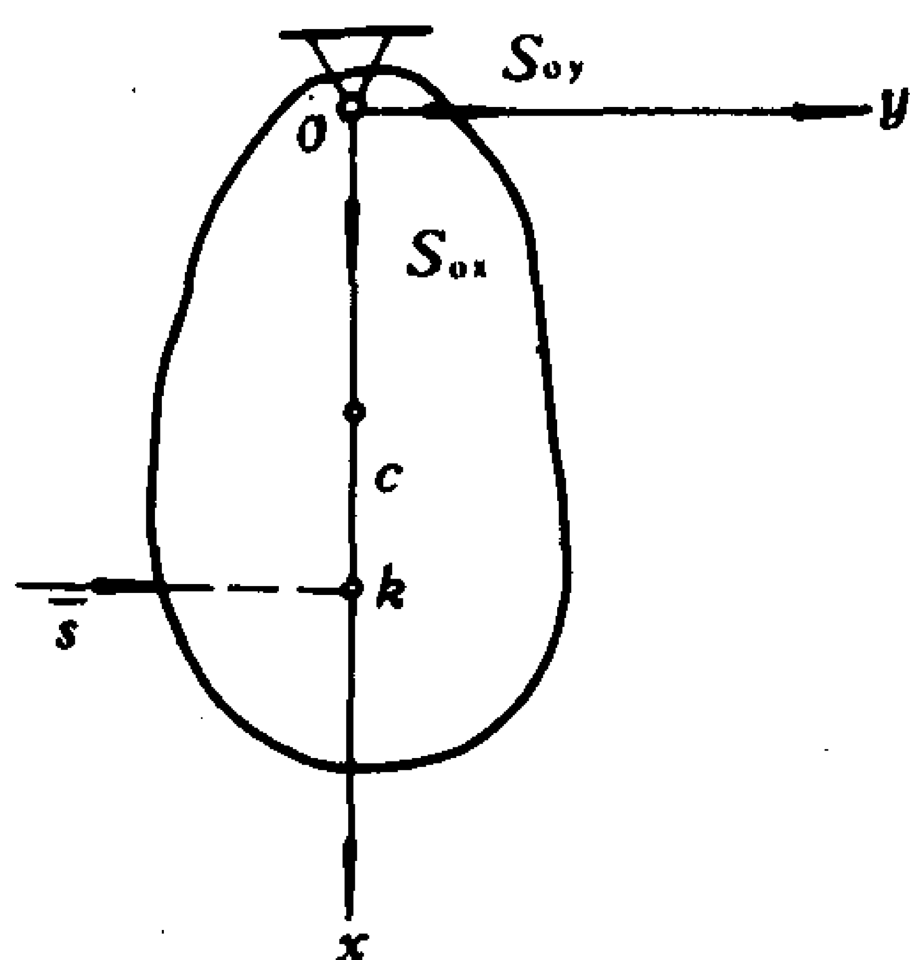


图 1.1.1-22　碰撞中心

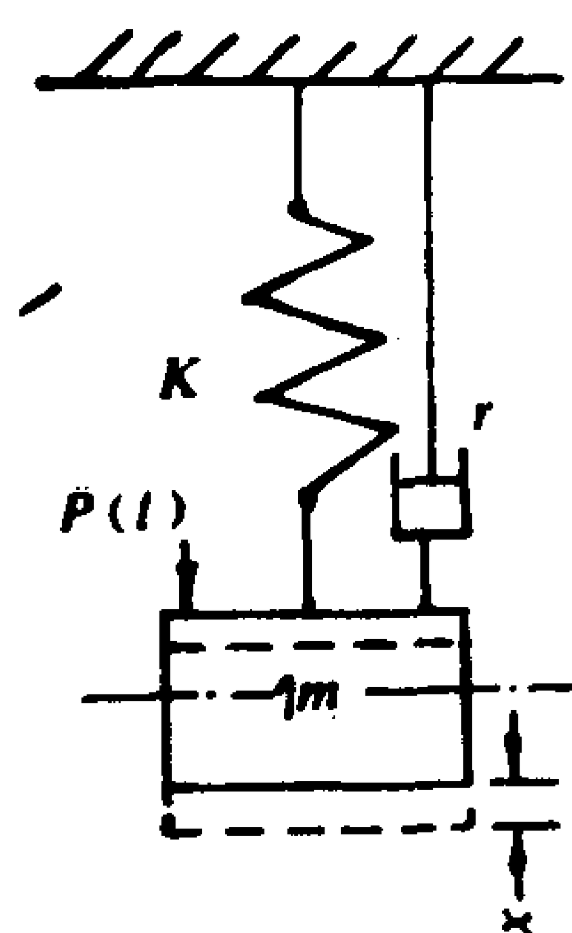


图 1.1.1-23　单自由度质量-弹簧系统

对于定轴转动的刚体，受到冲击时，会在支承处产生很大的碰撞力，通过对支承处碰撞冲量S_{ox}及S_{oy}的分析，可得如下结论：

当外碰撞冲量$\vec{S}$与oc(c为质心)的联线垂直，且支承点o到$\vec{S}$与oc联线的交点K间的距离满足条件：

$$OK=\frac{I_z}{M\cdot OC} \tag{1.1.1-47}$$

则支承处的碰撞冲量S_{ox}，S_{oy}均等于零；K点称为定轴转动刚体的碰撞中心。

6 机械振动基础

6.1 机械振动的基本概念

物体或物体系统在它的稳定平衡位置附近，作周期性的往复运动，称为机械振动。最基本的振动现象，可简化为如图 1.1.1-23 所示的单自由度质量——弹簧系统。弹簧K所引起的恢复力及系统本身的惯性m，是产生振动的内部原因；而激振力$P(t)$，阻尼力r，及对原始平衡位置的位移干扰等，则是产生和影响振动的外界原因。

物体或体系的运动方程，一般以体系离开平衡位置的位移为时间的函数来表达。振动中的最大位移，称为振幅A，振动往复一次的时间间隔，称为周期T，周期的倒数，即每秒钟振动的次数，称为频率f。以弧度/秒(rad/s)表示的频率，称为角频率ω，有时就简称为频率。T，f，ω之间的关系为：

$$\omega=2\pi f=2\pi\frac{1}{T} \tag{1.1.1-48}$$

机械振动中最基本的运动形式是简谐振动，一个振幅为A，频率为ω的简谐振动的表示方法，可参阅表 1.1.1-23

表 1.1.1-23 **简谐振动的表示方法**

内　　容	表　示　方　法
图　形	速度　x　位移　x　加速度　位移　ω　t　$\omega^2 A$　A　速度　ωA　t　$T=\frac{2\pi}{\omega}$
说　明	矢量A以等角速度ω作反时针方向旋转时，它在纵轴（或横轴）上的投影表示振动
振动位移	$x=A\sin\omega t$
振动速度	$\dot{x}=\omega A\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$
振动加速度	$\ddot{x}=\omega^2 A\sin(\omega t+\pi)$
振动位移、速度、加速度的关系	振动的位移、速度、加速度的频率相同，且都等于ω。最大位移即振幅A 振动速度矢量比位移矢量超前 90°，最大速度$v_0=\omega A$ 振动加速度矢量比位移矢量超前 180°，最大加速度$a_0=\omega^2 A$①

① 工程中常用振动最大加速度与重力加速度g之比来表示最大加速度。如简谐振动时的最大加速度为 5g，即表示最大加速度幅值$\omega^2 A=5g$。

工程中描述振动强度大小的物理量有峰值，峰-峰值，均方根值等数种。其表达式可见下表 1.1.1-24

表 1.1.1-24 **周期振动大小的描述量**

名称	计算公式	简谐振动时各描述量与振幅之比	图形
峰值X_F（振幅）	$x(t)$的最大值	1	
峰-峰值X_{FF}（双振幅）	$x(t)$的最大值和最小值之差	2	
平均绝对值 $\lvert X \rvert$	$\frac{1}{T}\int_0^T \lvert x(t) \rvert dt$	0.636	
均方值X_{ms}	$\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt$	—	
均方根值X_{rms}（有效值）	$\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt}$	0.707	

6.2 线性自由振动系统

6.2.1 单自由度线性振动系统

单自由度线性系统自由振动的动力学方程为：

$$m\ddot{x}+r\dot{x}+kx=0 \tag{1.1.1-49}$$

通过一个独立坐标即可确定振动过程中任一瞬时的位置，而且r为$\dot{x}$的线性函数，k为x的线性函数，因而微分方程是线性的，所以称为线性振动系统。上述方程所确定的运动，与系统的阻尼大小有关。在小阻尼情况下，线性微分方程的通解为：

$$x=Ae^{-\alpha t}\sin(\omega_r t+\varphi) \tag{1.1.1-50}$$

其运动情况与阻尼的大小及初始干扰有关。表 1.1.1-25 给出有初始位移$x=x_0$，初速度$\frac{dx}{dt}=\dot{x}=V_0$时运动方程中的各项计算结果。

表 1.1.1-25 **单自由度系统自由振动的运动情况**

阻尼及运动方程	运动情况
无阻尼时，$\zeta=0$ $r=0$，$a=0$ $x=A\sin(\omega_n t+\varphi)$	$\omega_n=\sqrt{\frac{K}{m}}$，$A=\sqrt{x_0^2+\left(\frac{v_0}{\omega_n}\right)^2}$，$\varphi=\mathrm{arctg}\frac{x_0\omega_n}{v_0}$ 系统作等幅振动，振动持续不断
减幅阻尼时，$\zeta<1$ $r<r_c$，$a<\omega_n$ $x=A_e^{-\alpha t}\sin(\omega_r t+\varphi)$	$\omega_r=\sqrt{\omega_n^2-\alpha^2}$，$A=\sqrt{x_0^2+\left(\frac{v_0+\alpha x_0}{\omega_r}\right)^2}$，$\varphi=\mathrm{arctg}\frac{x_0\omega_r}{v_0+\alpha x_0}$ 系统作减幅振动，即振幅随时间减小。相邻两个振幅之比称为减幅系数$\eta=\frac{A_n}{A_{n+1}}$。相邻两个振幅比的自然对数称为对数减缩$\delta=\ln\frac{A_n}{A_{n+1}}=\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$，若第1个振幅为$A_1$，第$n$个振幅为$A_n$，则$\delta=\frac{1}{(n-1)}\ln\frac{A_1}{A_n}$。系统的衰减系数$\alpha=\frac{\omega_r}{2\pi}\delta\approx\frac{\omega_n}{2\pi}\delta$
临界阻尼时，$\zeta=1$ $r=r_c$，$a=\omega_n$ $x=e^{-\alpha t}(C_1+C_{2t})$	系统作逐渐返回其平衡位置的非周期性运动，是从振动过渡到不振动的临界情况，此时的阻尼系数，叫做临界阻尼系数
过量阻尼时，$\zeta>1$ $r>r_c$，$\alpha>\omega_n$ $x=Ae^{-\alpha t}\mathrm{sh}(\sqrt{a^2-\omega_n^2}t+\varphi)$	系统不振动，而作缓慢地返回平衡位置的非周期性运动

表中：m——振动体的质量；K——弹簧的刚度；r——阻尼系数；r_c——临界阻尼系数$r_c=2\sqrt{mK}$；ζ——阻尼比，$\zeta=\frac{r}{r_c}$；α——衰减系数，$\alpha=\frac{r}{2m}$；A——振幅；φ——相位角；ω_n——无阻尼固有频率；ω_r——有阻尼固有频率；x_0——初位移；v_0——初速度

由上表结果可知：阻尼系数γ的大小不同，会引起图 1.1.1-24 中所示的不同运动结果。

6.2.2 线性系统的刚度和阻尼

1)线性系统的刚度　线性振动系统的弹性恢复力与位移的一次方成正比；其比例系数，即产生单位位移所需要的力，称为刚度K。对于扭振系统，产生单位角位移所需的扭矩，称为扭转刚度C。常见弹性元件的刚度计算公式，可参阅表 1.1.1-26。

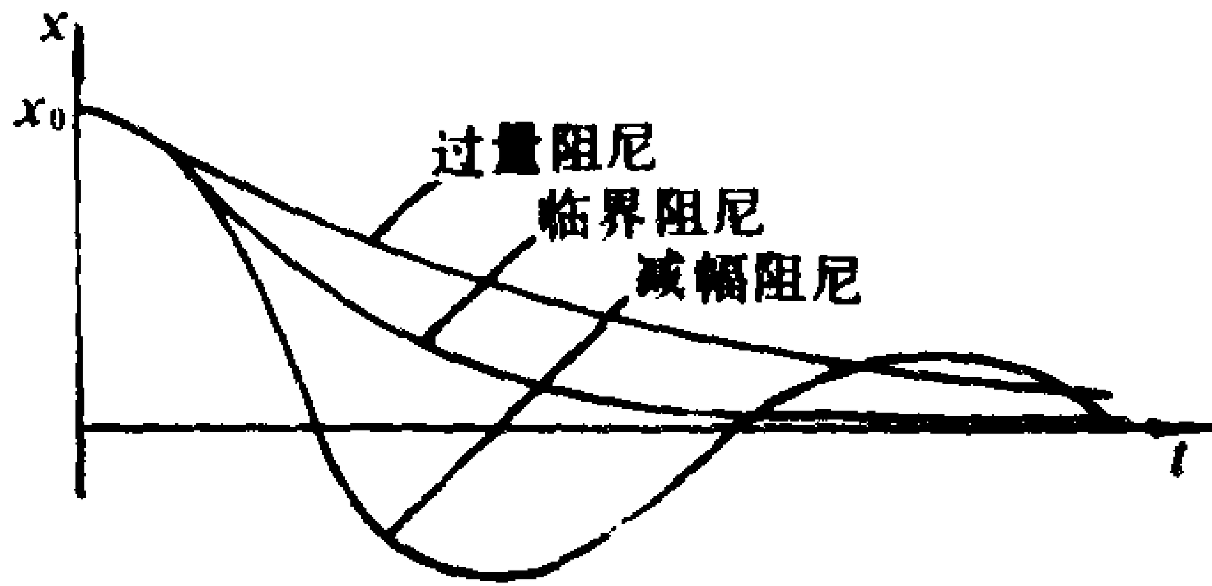


图 1.1.1-24　单自由度振动系统的三种运动情况

表 1.1.1-26　**简单弹性元件的刚度**

<table>
<tr><th>简　　图</th><th>说　　明</th><th>刚　度　K　或　C</th></tr>
<tr><td></td><td>圆柱形拉伸或压缩弹簧</td><td>圆形截面　$K=\frac{Gd^4}{8ND}$
矩形截面　$K=\frac{4Ghb^3\eta}{\pi ND}$
<table><tr><td>h/b</td><td>1</td><td>1.5</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>η</td><td>0.141</td><td>0.196</td><td>0.229</td><td>0.263</td><td>0.281</td></tr></table></td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>两个串联弹簧</td><td>$\frac{1}{K}=\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}$</td></tr>
<tr><td>N个串联弹簧</td><td>$\frac{1}{K}=\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}+\cdots\frac{1}{K_n}=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{K_i}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>两个并联弹簧</td><td>$K=K_1+K_2$</td></tr>
<tr><td>N个并联弹簧</td><td>$K=K_1+K_2+\cdots K_N=\sum_{i=1}^{N}K_i$</td></tr>
<tr><td></td><td>混联弹簧</td><td>$K=\frac{(K_1+K_2)K_3}{K_1+K_2+K_3}$</td></tr>
</table>

续上表

简　　图	说　　明	刚 度 K 或 C
l, b, h, d	等截面悬臂梁	$K=\frac{3EI_a}{l^3}$; (1)圆形截面 $K=\frac{3\pi d^4E}{64l^3}$ (2)矩形截面 $K=\frac{bh^3E}{4l^3}$
l_1, l_2, l	两端固定的梁	$K=\frac{3EI_a l^3}{l_1^3 l_2^3}$ 当$l_1=l_2$时 $K=\frac{192EI_a}{l^3}$
l a) D　b) D_K　c) D_1 d) D_1　e) D_1　f) a, b	实　心　轴	a) $C=\frac{G\pi D^4}{32l}$;　b) $C=\frac{G\pi D_K^4}{32l}$; c) $C=\frac{G\pi D_1^4}{32l}$;　d) $C=1.18\frac{G\pi D_1^4}{32l}$; e) $C=1.1\frac{G\pi D_1^4}{32l}$　f) $C=a\frac{G\pi b^4}{32l}$

a/b	1	1.5	2	3	4
a	1.43	2.94	4.57	7.90	1.123

表中：E——弹性模量N/m²；I_a——截面惯性矩m⁴；D——弹簧中径m。
N——弹簧有效圈数；G——剪切弹性模量N/m²。

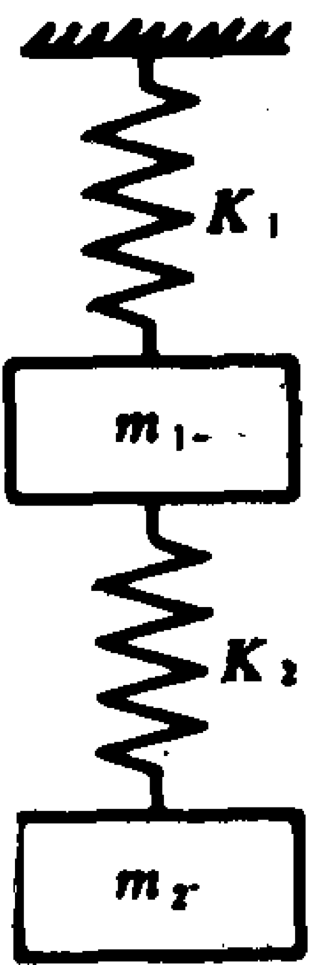


图1.1.1-25　二自由度振动系统

2)线性系统的阻尼系数　线性振动系统的振动体所受到的阻尼力与运动速度的一次方成正比，比例系数用r表示。对于扭转振动体系，阻尼力矩与角速度的一次方成正比，用r_τ来表示。机器运动构件常见的阻尼情况及阻尼系数计算公式，可参阅表 1.1.1-27。

6.2.3　两自由度及多自由度线性系统自由振动

确定两个自由度振动系统的运动，需要两个独立的坐标和运动方程。如图 1.1.1-25 所示的两自由度振动系统，取重块m_1及m_2相对其静平衡位置的位移x_1及x_2为独立坐标值，即可

推出系统作自由振动时的动力学方程为：

表 1.1.1-27　　　　阻 尼 系 数

简图				
说明	液体介于具有相对运动的二平行板之间	板在液体内平行移动	液体通过移动的活塞柱面与缸壁间的间隙	液体通过移动活塞中的小孔
粘性阻尼系数	$r=\frac{\eta A}{t}$ A——上板与液体的接触面积cm² t——液层厚度cm	$r=\frac{2\eta A}{t}$ A——动板的一侧与液体的接触面积cm²	$r=\frac{6\pi\eta l d^3}{(D-d)^3}$	$r=\frac{8\pi\eta l}{n}\left(\frac{D}{d}\right)^4$ n——小孔数

简图			
说明	液体介于具有相对运动的两同心圆柱之间	液体介于具有相对运动的两同心圆盘之间	液体介于具有相对运动的圆柱形壳与圆盘之间
粘性阻尼系数	$r_\tau=\frac{\pi\eta l(D_1+D_2)^3}{2(D_1-D_2)}$	$r_\tau=\frac{\pi\eta}{32t}(D_1^4-D_2^4)$	$r_\tau=\pi\eta\left(\frac{bD_1^2D_2^2}{D_1^2-D_2^2}+\frac{D_2^4-D_3^4}{16t}\right)$

表中：r——粘性阻尼系数N/m；η——动力粘度kN/m；r_τ——粘性扭转阻尼系数N·m·s/rad。

$$m_1\ddot{x}_1+(K_1+K_2)x_1-K_2x_2=0 \tag{1.1.1-51}$$

$$m_2\ddot{x}_2-K_2x_1+K_2x_2=0 \tag{1.1.1-52}$$

同理，确定n个自由度系统的自由振动，需要n个独立的坐标和运动方程，其动力学方程的一般形式为：

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1.1.1-53}$$

多自由度振动系统的运动方程的求解，一般要用计算机进行，可详见本手册后面的有关章节，其结果为n个固有频率ω_1，$\omega_2\cdots\omega_n$；及与每一个固有频率相对应的振型。

6.2.4 固有频率

当系统作自由振动时，其振动频率，与系统本身的质量(或转动惯量)、刚度及阻尼有关。这个由系统本身固有性质决定的振动频率，称为系统的固有频率。一些常见的无阻尼系统固有频率的计算公式，可参阅表 1.1.1-28。有阻尼情况时的振动系统的固有频率，与无阻尼情

况时的固有频率，一般比较接近，也可用表中的计算公式得出近似值。多自由度系统的自由振动，其固有频率按数值自小向大排列，最小的固有频率，称为基频。然后，依次由低阶向高阶排列，表 1.1.1-28 中列出了一些简化为有限自由度的弹性物体如杆、梁等的低阶固有频率。

表 1.1.1-28　**弹簧-质量系统、摆、弦及轴系振动的固有频率**

类别	系统简图	说明	固有频率 (ω_n)rad/s
弹簧—质量系统	K, m_s, m	一个质量，一个弹簧的系统	$\omega_n=\sqrt{\frac{K}{m}}$ 若计及弹簧的质量 m_s $\omega_n=\sqrt{\frac{3K}{3m+m_s}}$
	K_2, m, K_1；K_1, K_2, m	一个质量，两个弹簧并联的系统	$\omega_n=\sqrt{\frac{K_1+K_2}{m}}$
		一个质量，n个弹簧并联的系统	$\omega_n=\sqrt{\frac{K_1+K_2+\cdots K_n}{m}}$
	K_1, K_2, m	一个质量，两个弹簧串联的系统	$\omega_n=\sqrt{\frac{K_1K_2}{m(K_1+K_2)}}$
		一个质量，n个弹簧串联的系统	$\omega_n=\sqrt{\frac{1}{m\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{K_i}\right)}}$
	m_1, K, m_2	两个质量，一个弹簧的系统	$\omega_n=\sqrt{\frac{K(m_1+m_2)}{m_1m_2}}$

类别	系统简图	说明	固有频率 (ω_n) rad/s
弹簧—质量系统		杠杆摆	$\omega_n=\sqrt{\dfrac{Kr^2\cos^2\alpha-Pr\sin\alpha}{ml^2}}$ 式中 $P=K\delta_{st}$ δ_{st}——弹簧静位移cm
		质量位于被铰支和弹簧支承的刚性梁系统	$\omega_n=\sqrt{\dfrac{Kl^2}{ma^2}}$ 若计及梁的质量m_1 $\omega_n=\sqrt{\dfrac{3Kl^2}{3ma^2+m_1l^2}}$ 当具有n个质量的情况时 以$m_1a_1^2+m_2a_2^2+\cdots+m_na_n^2$代替上式中的$ma^2$ 当具有n个弹簧的情况时 以$K_1l_1^2+K_2l_2^2+\cdots K_nl_n^2$代替上式中的$Kl^2$
		双簧摆	$\omega_n=\sqrt{\dfrac{Ka^2}{ml^2}+\dfrac{g}{l}}$
		刚性梁为两个弹簧所支持的系统	$\omega_n^2=\dfrac{1}{2}(a+c)\mp\dfrac{1}{2}\sqrt{(a-c)^2+4\left(\dfrac{b}{\rho}\right)^2}$ 式中：$a=\dfrac{K_1+K_2}{m}$ $b=\dfrac{K_2l_2-K_1l_1}{m}$ $c=\dfrac{K_1l_1^2+K_2l_2^2}{m\rho^2}$ $\rho=\sqrt{\dfrac{I}{m}}$

类别	系 统 简 图	说 明	固 有 频 率 (ω_n)rad/s
		单摆	$\omega_n=\sqrt{\dfrac{g}{l}}$
	l	物理摆	$\omega_n=\sqrt{\dfrac{gl}{\rho^2+l^2}}$ l——摆的重心至转轴中心的距离
摆杆梁类	0.774 0.500　0.868 a) 0.500 0.359　0.641 b)	等截面杆、梁类的横向振动	$\omega_n=\dfrac{a_n^2}{l^2}\sqrt{\dfrac{EI_n}{\rho l}}$ 式中：a_n——振型常数 a) 一端固定，一端自由，a_n由下式求得： $1+\mathrm{ch}a\cdot\cos a=0$ $a_1=1.875$，$a_2=4.694$，$a_3=7.855$，… b) 两端固定，a_n由下式求得： $1-\mathrm{ch}a\cdot\cos a=0$ $a_1=4.730$，$a_2=7.853$，$a_3=10.996$，…
	m　m_s a　b l a) m　m_s a　b l b)	横梁上有集中质量的横向振动	a) 质量位于两端固定的梁上 $\omega_n=\sqrt{\dfrac{3EI_a l^3}{(m+0.375m_s)a^3b^3}}$ b) 质量位于两端简支的梁上 $\omega_n=\sqrt{\dfrac{3EI_a l}{(m+0.49m_s)a^2b^2}}$

续上表

类别	系统简图	说明	固有频率 (ω_n)rad/s
轴系扭转振动		一端固定一端有圆盘的轴系	$\omega_n=\sqrt{\frac{C}{I}}$ 若计及轴的转动惯量I_s: $\omega_n=\sqrt{\frac{3C}{3I+I_s}}$
		两端固定中间有圆盘的轴系	$\omega_n=\frac{GI_p(l_1+l_2)}{Il_1l_2}$
		三轴段两圆盘的系统	$\omega_n^2=\frac{1}{2}(\omega_{11}^2+\omega_{22}^2)$ $\mp\frac{1}{2}\sqrt{(\omega_{11}^2-\omega_{22}^2)^2+4\omega_{12}^4}$ 式中：$\omega_{11}^2=\frac{C_1+C}{I_1}$， $\omega_{22}^2=\frac{C_2+C}{I_2}$，$\omega_{12}^2=\frac{C}{\sqrt{I_1I_2}}$
		两轴段三圆盘的系统	$\omega_n^2=\frac{1}{2}(\omega_1^2+\omega_2^2+\omega_3^2)$ $\mp\frac{1}{2}\sqrt{(\omega_1^2+\omega_2^2+\omega_3^2)-4\omega_1^2\omega_3^2\frac{I_1+I_2+I_3}{I_2}}$ 式中：$\omega_1^2=\frac{C_1}{I_1}$，$\omega_2^2=\frac{C_1+C_2}{I_2}$，$\omega_3^2=\frac{C_2}{I_3}$

表中：m——振动体的质量kg；I——振动体的转动惯量N·m·s²；
K——弹簧的刚度N/m；ρ——振动体的回转半径m；
ρl——弦单位长度的质量kg；T——弦受的张力N；
g——重力加速度m/s²；E——弹性模量N/m²；
C——扭转刚度N·m/rad；I_p——极惯性矩m⁴；
G——剪切弹性模量N/m²；I_0——截面惯性矩m⁴；
ρ_v——单位体积的质量kg/m³；l——杆、梁的长度m。

6.3 单自由度线性系统的受迫振动

由于阻尼的存在，自由振动会很快地衰减而消失，但如有持续不断的激振力或其它外部干扰作用，则系统将产生持续的振动，这种振动称为受迫振动。

当引起受迫振动的激振力没有明确的规律性，但在大量试验中呈现统计规律时，这种受迫振动称为随机振动。

单自由度振动系统，受到有规律的简谐激振力 $P\sin\omega_j t$ 的作用，或在支承处，受到激振位移 $U\sin\omega_j t$ 的作用时，振动系统的动力系方程的一般形式为：

$$m\ddot{x}+r\dot{x}+kx=P\sin\omega_j t \quad (1.1.1\text{-}54)$$

它的解为：

$$x=x_1+x_2 \quad (1.1.1\text{-}55)$$

式中：　x_1——因阻尼而很快消失的自由振动；

　　　x_2——激振力引起的持续受迫振动。

受迫振动 x_2的形式为：

$$x_2=A\sin(\omega_j t-\varphi) \tag{1.1.1-56}$$

式中，A为受迫振动的振幅；φ为质量块的位移 x 与正弦激振力间的相位差。其计算公式，可参阅表 1.1.1-29。

表 1.1.1-29　　　　**单自由度振动系统受迫振动的振幅及相位差**

激　振	序号	阻尼的种类	振　幅	相位差
振动体受简谐激振力 $P\sin\omega_j t$	1	粘性阻尼 阻尼力 $=r\dot{x}$	$A=\frac{A_{st}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+(2\zeta\lambda)^2}}$	$\mathrm{tg}\varphi=\frac{2\zeta\lambda}{1-\lambda^2}$
	2	干摩擦阻尼 阻尼力 $=\pm F$	$A=\pm\frac{A_{st}\sqrt{1-\left(\frac{4F}{\pi P}\right)^2}}{1-\lambda^2}$	
	3	流体摩擦阻尼 阻尼力 $=r_2\dot{x}^2$	$A=\pm\frac{3\pi m}{8r_2\lambda^2}\sqrt{\frac{-(1-\lambda^2)^2}{2}\pm\sqrt{\frac{(1-\lambda^2)^4}{4}+\left(\frac{8r_2P\lambda^2}{3\pi Km}\right)^2}}$	
	4	结构阻尼 每振动周期消耗的能量 $W=bA^2$	$A=\frac{A_{st}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+\left(\frac{b}{\pi K}\right)^2}}$	
系统支承受简谐激振位移 $U\sin\omega_j t$	5	粘性阻尼 阻尼力 $=r\dot{x}$	振动体相对于支承的振幅 $A_1=\frac{\lambda^2 U}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+(2\zeta\lambda)^2}}$	$\mathrm{tg}\varphi=\frac{2\zeta\lambda}{1-\lambda^2}$
	6		振动体的绝对振幅 $A=\frac{U\sqrt{1+(2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+(2\zeta\lambda)^2}}$	$\mathrm{tg}\varphi=\frac{2\zeta\lambda^3}{(1-\lambda^2)+(2\zeta\lambda)^2}$

表中：$A_{st}=\frac{P}{K}$——在与激振力幅值相等的静力P作用下系统的静位移 cm；$\lambda=\frac{\omega_j}{\omega_n}$——频率比；

$\omega_n=\sqrt{\frac{K}{m}}$——系统的固有频率 rad/s；$\zeta=\frac{r}{r_c}$——阻尼比；$r_c=2\sqrt{mK}$——临界阻尼系数。

表中的振幅比 A/A_{st} 及相位φ与频率比λ及阻尼比ξ的关系，均反映了受迫振动的重要特性，可参阅图 1.1.1-26 中的曲线。

通过对图表的分析，可知：

1)受迫振动的频率，与简谐激振力的频率相同。

2)受迫振动的振幅，除与激振力的幅度 P 和频率 ω_j 有关之外，还与系统的固有频率及阻尼有关；特别是当激振频率 ω_j 与固有频率 ω_n 接近时，振幅急剧增加，这种现象称为共振；阻尼愈小，共振愈强烈，而当λ变大时，振幅大大减小，$\lambda>\sqrt{2}$之后，振幅小于静位移 A_{st}。

3)相位变化情况，如图 1.1.1-26 b) 所示。在共振点上，受迫振动的位移，滞后于激振 90°，并与阻尼大小无关。

6.4　减振与隔振的基本概念

共振或接近共振的情况，将使系统产生强烈的振动。鉴于动力机械大都是旋转机械，难以避免周期性的激振干扰力，为避免共振或强烈振动现象的产生，首先应该在设计振动系统

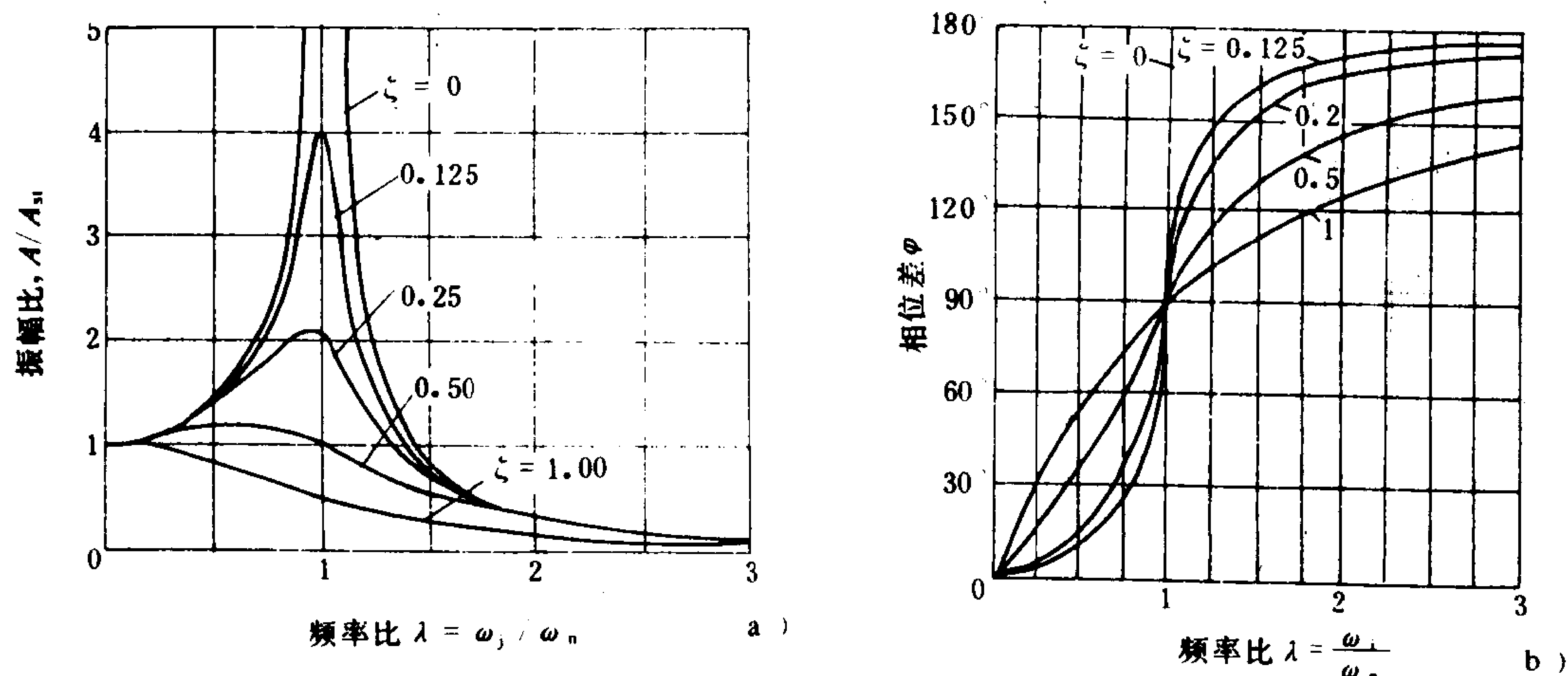


图 1.1.1-26 单自由度受迫振动系统的幅频及相频响应曲线

a）幅频响应曲线；b）相频响应曲线

（如发动机的机架）时，控制它的固有频率，以避免与估计的激振干扰频率相接近。此外，也可以采用减振装置或隔振措施。

减振方法是在振动系统上装上摩擦或电磁式的减振器，大大增加振动系统的阻尼，从而减少共振时的振幅。

隔振措施是将激振源与周围隔离起来，或将振动系统与频率相近的激振源隔离。

关于减振和隔振的具体应用及有关的理论分析，可参阅有关的专著。

7 构件强度刚度计算的基本概念

7.1 强度刚度计算的基本概念

7.1.1 构件正常工作的三个基本要求

构件受力时，会产生变形。当受力超过一定限度之后，还会发生破坏，为使构件能正常工作，应满足三个基本要求。

1)强度　构件在工作中能抵抗破坏的能力，即构件保证不会发生断裂或屈服。

2)刚度　工程上一般要求构件受力时的变形，限制在某一规定的弹性范围内，即构件必须具备足够的刚度；

3)稳定性　构件受力时，不致突然丧失其原来稳定的几何形状而失效。如细长杆在受压时，若压力超过某临界值，会突然变弯以致折断，这就是失去稳定性的例子。

轮机工程中常见机械的构件，保证其强度是主要的，所以一般以进行强度计算为主，必要时才进行变形计算，校验刚度。应用变形计算解超静定问题的方法，可参阅结构力学有关专著。关于稳定性计算的概念，可见本章第 9 节。

7.1.2 构件受力时的内力与内力图

构件受外力作用时，构件内部质点之间，将产生一种附加的相互作用力，截面上这种质点内力的合成，称为构件截面上的内力。

如已知构件上所受的外力，确定截面上的内力可应用截面法，其步骤如下：

1)沿需求内力的截面，将构件假想地截开；

2)任选其中一部分作为研究对象；

3)在被截开的面上，以向截面形心简化后的结果——内力，来代替去掉部分上所有外力对选取部分的作用；

4)列出平衡方程，求出截面上内力的大小。

选取不同的截面，其上的内力也不同。强度计算关注的截面是垂直于杆件轴线的截面，即横截面。随着横截面坐标变化的内力函数关系，称为内力方程。

由内力方程画成的沿轴线变化的内力值分布图，称为内力图。从内力图上可以直观地看出内力沿构件长度方向的变化情况，从而确定最大内力的数值及其所在截面的位置。

构件受外力时，可以产生拉伸(压缩)、扭转、弯曲三种基本变形，其横截面上的内力分别为轴力（N）、扭矩（Mn）和切力（Q）及弯矩（M）。任何复杂的变形都可归结为这几种基本变形的组合，称为组合变形。其内力可用各种基本变形的内力叠加而成。关于基本变形构件的内力方程与内力图以及典型实例，可参阅表 1.1.1-30。

7.1.3 内力的分布集度——应力

构件横截面上的内力随外力增加而增加，达到一定的限度时，构件将产生破坏。构件破坏不仅与内力的数值大小有关，而且还与横截面的尺寸和形状有关；构件的破坏往往又是从截面上某一点开始，所以，必须了解内力在截面上的分布集度，即单位面积上的内力——应力。应力的度量一般不用图 1.1.1-27 b) 中所示的合应力 Pa，而是用它在垂直截面截面方向的分量正应力 σ_a，和与截面平行的分量剪应力 τ_a 来表达，如图 1.1.1-27 c) 中所示，其相互间的关系为：

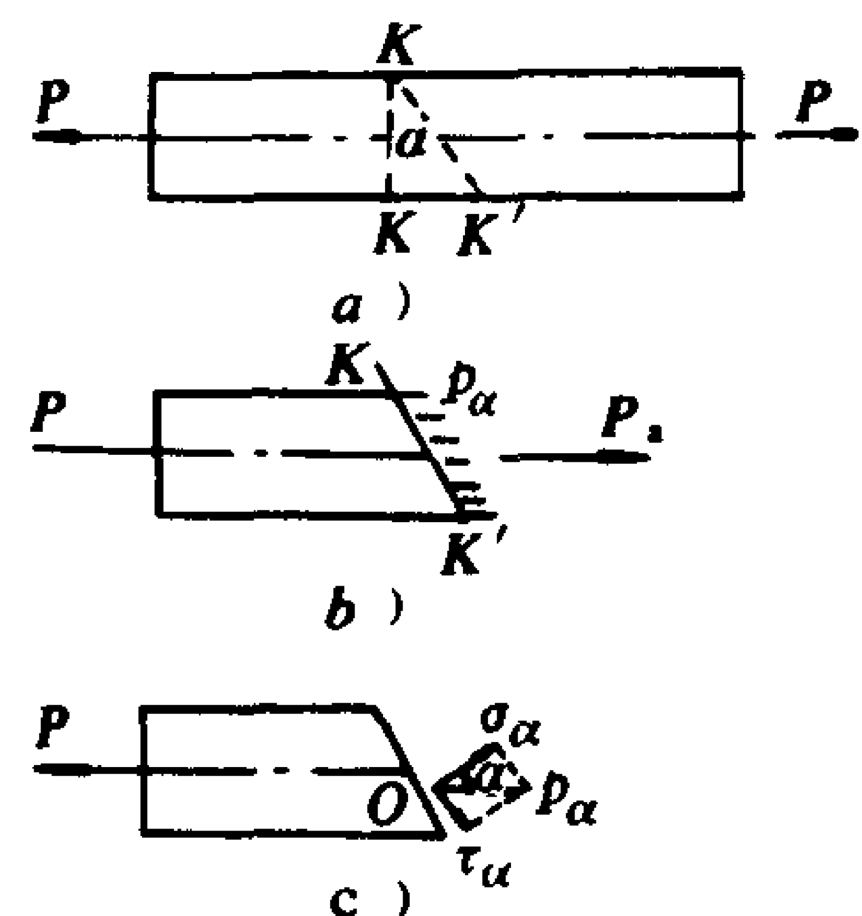


图 1.1.1-27 截面上的应力

$$Pa=\sqrt{\sigma_a^2+\tau_a^2};\quad \sigma_a=Pa\cos\alpha;\quad \tau_a=Pa\sin\alpha \tag{1.1.1-57}$$

应力的常用单位为：N/mm^2 或 MN/m^2，也可写成 MPa。

7.1.4 强度条件

对于基本变形构件，横截面上只有一种内力或以一种内力为主，因此在构件横截面上，只有正应力或剪应力。常用的强度条件是：横截面上最大的正应力 σ_{max} 或剪应力 τ_{max} 必须小于或等于构件材料的许用应力〔σ〕或〔τ〕，即：

$$\sigma_{max}\leqslant[\sigma];\quad \tau_{max}\leqslant[\tau] \tag{1.1.1-58}$$

7.1.5 变形概念及刚度条件

1)绝对变形　在弹性范围内，构件纵向变形呈拉伸时，伸长量$\Delta l=l'-l_0$，如图 1.1.1-28 所示，称为绝对伸长变形，由实验可知，在轴向力N及截面积A不变时：

$$\Delta l=\frac{Nl}{EA}\quad \text{cm} \tag{1.1.1-59}$$

式中：E——材料的弹性模量，可详见下节。

2)相对变形

(1)相对线变形　单位长度的变形，即为相对线变形——线应变，用ε表示。

$$\varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0} \tag{1.1.1-60}$$

表 1.1.1-30 内力方程与内力图

内力图名称	内力值的确定	内力正负号规定	实例：内力方程	实例：内力图
轴力图	横截面上的轴力，数值上等于该截面一侧杆上所有外力沿杆轴线投影的代数和	外力在横截面上引起的轴力N，拉为正，压为负 P—N(+) P—N(−)	两级空气压缩机活塞杆 $P_1=60\text{kN}$，$P_2=35\text{kN}$ $P_3=25\text{kN}$ I-I截面：$N_1=-P_3=-25\text{kN}$ II-II截面：$N_2=-P_3-P_2=-60\text{kN}$	轴力图 N, kN：25，60 横坐标x轴——横截面位置 纵坐标N——轴力值 正值画于坐标正向，负值画于坐标负向
扭矩图	横截面上的扭矩，数值上等于该截面一侧轴上所有外力对杆轴线力矩的代数和	按右手规则，外力矩在横截面上引起的扭矩M_n，姆指方向背离截面者为正，指向截面者为负 $M_n(+)$ $M_n(-)$	车床主轴 $m_1=6960\ \text{N}\cdot\text{cm}$，$m_2=696\ \text{N}\cdot\text{cm}$ $m_3=6264\ \text{N}\cdot\text{cm}$ I-I截面：$M_{n1}=0$ II-II截面：$M_{n2}=m_2=696\ \text{N}\cdot\text{cm}$ III-III截面：$M_{n3}=m_2-m_1$ $=-6264\ \text{N}\cdot\text{cm}$	扭矩图 M_n, N·cm：696，6264 横坐标x轴——横截面位置 纵坐标M_n——扭矩值 正值画于坐标正向，负值画于坐标负向

续上表

内力图名称	内力值的确定	内力正负号规定	实例：内力方程	实例：内力图
切力图与弯矩图	切力： 横截面上的切力，数值上等于该截面一侧杆上所有外力的代数和 弯矩： 横截面上的弯矩，数值上等于该截面一侧杆上所有外力对截面形心力矩的代数和	在截面左边向上的外力或右边向下的外力引起的切力Q为正，反之为负 P Q (+) P P Q (-) P 在截面一边所有外力所引起的弯矩M使该段变形向下凹者为正，向上凸者为负 M(+) m m M(-) m m	镗刀杆 $P=300\ \mathrm{N}$ $a=40\ \mathrm{cm}$ P x a x $0 \leq x \leq a$ $Q(x)=-P=-300\ \mathrm{N}$ $M(x)=-Px=-30x$ $x=0,\ M=0$ $x=a,\ M=-Pa=-12000\ \mathrm{N\cdot cm}$	P 切力图 Q, N O ⊖ 300 x 弯矩图 M, N·cm O ⊖ 1200。 x 横坐标x轴——横截面位置 纵坐标Q——切力值 M——弯矩值 正值画于坐标正向，负值画于坐标负向

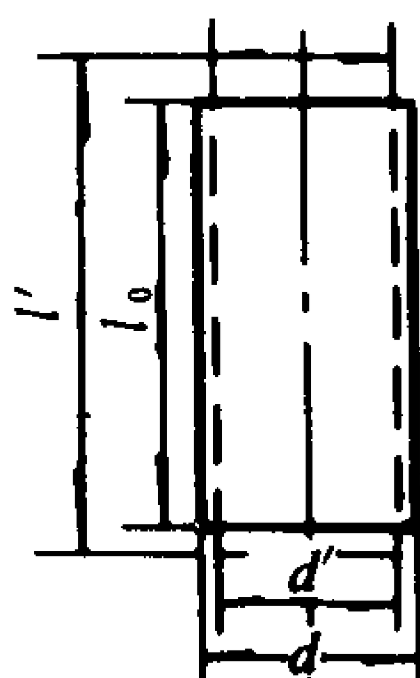


图 1.1.1-28 线变形

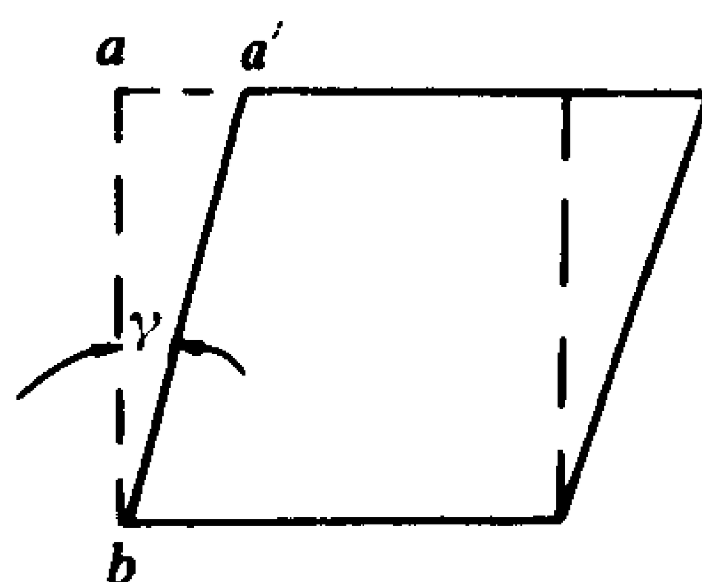


图 1.1.1-29 角变形

（2）相对角变形。直角的角度改变，称为相对角变形——切应变，用γ表示，如图 1.1.1-29 所示，

$$\gamma=\frac{aa'}{ab} \tag{1.1.1-61}$$

3)横向线应变　若拉杆横向尺寸为 d，则可得 $\varepsilon'=\frac{d'-d}{d}=\frac{\Delta d}{d}$，$\varepsilon'$称为横向线应变。

横向线应变与纵向线应变的关系为：

$$\varepsilon'=-\mu\varepsilon \tag{1.1.1-62}$$

式中：μ——材料横向变形系数；

负号表示两种应变 ε'与ε必为异号。

4)刚度条件　构件工作时，最大的变形必须小于或等于构件工作条件所许可的变形量〔Δl〕即：

$$\Delta l_{max}\leq〔\Delta l〕 \tag{1.1.1-63}$$

各种基本变形下构件的变形计算方法可见下文。

7.2 常用金属材料的机械性能

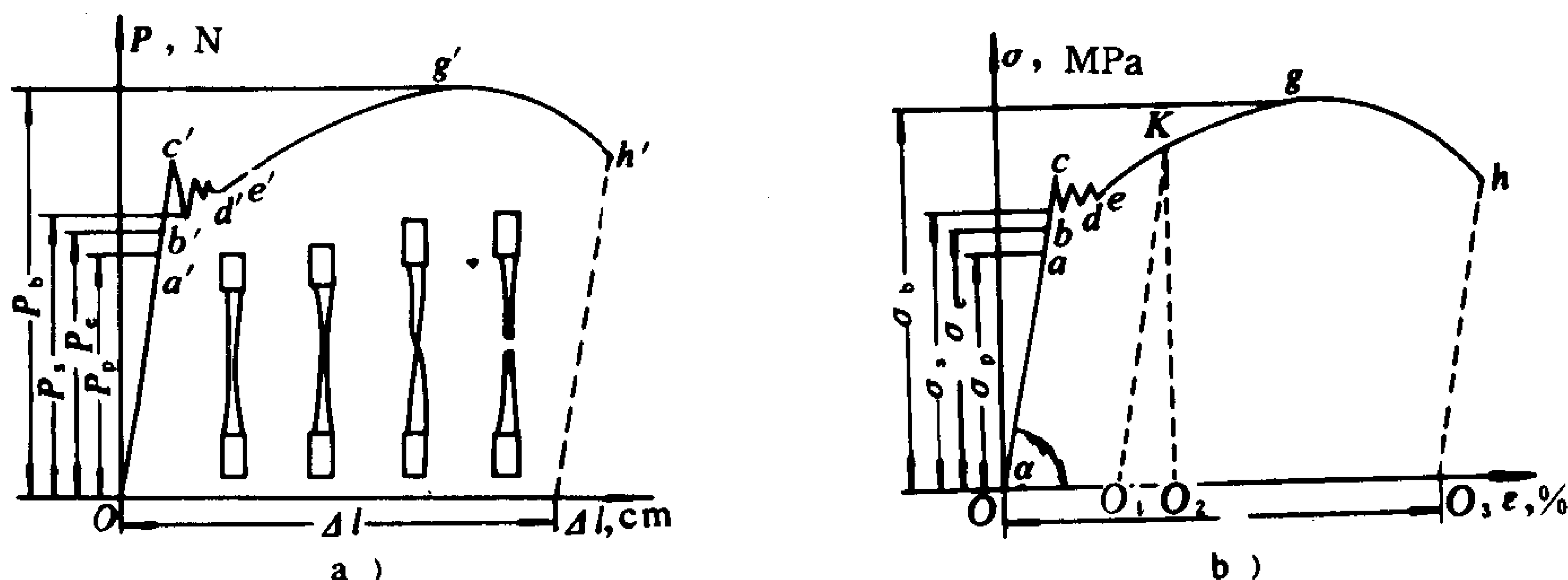


图 1.1.1-30　低碳钢试件的拉伸图和应力-应变曲线

a）低碳钢试件的拉伸图；b）低碳钢材料拉伸时的应力-应变图

构件强度与制造构件的材料性能密切相关。低碳钢拉伸时的应力〔σ〕——应变（ε）曲

线，最典型地反映了金属材料的机械性能，如图 1.1.1-30 所示。其说明可见表 1.1.1-31。

表 1.1.1-31　　低碳钢拉伸时的机械性能

变形阶段	性能参数	变形特点与说明	计 算 公 式
弹性阶段（ob 段）	比例极限 σ_p	试件的应力与应变保持正比时的最大应力值。对应图 1.1.1-30 b) 中的a点	$\sigma_p=\frac{P_p}{A}$ 式中：P_p——试件的应力与应变成正比时的最大载荷 A——试件横截面原面积（以下同）
	弹性极限 σ_c	试件只产生弹性变形的最大应力值。对应图 1.1.1-30 b) 中的 b 点	$\sigma_c=\frac{P_c}{A}$ 式中：P_c——试件在弹性阶段的最大载荷
	弹性模量 E	在比例极限的范围内，应力与应变成正比时的比例常数	$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\mathrm{tg}\alpha$ 式中：α——弹性阶段 oa 线与横坐标轴的夹角
	横向变形系数（泊松比）μ	在弹性范围内，试件横向应变与纵向应变的比值	$\mu=\left\|\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right\|$ $\varepsilon'=-\mu\varepsilon$ 式中：ε'——试件的横向应变 ε——试件的纵向应变
屈服阶段（ce 段）	屈服极限 σ_s	试件内应力不增加，应变仍继续增加时的最低应力值。对应图 1.1.1-30 b) 中的 d 点。这时，在试件表面有滑移线，它与轴线的夹角约成 45°	$\sigma_s=\frac{P_s}{A}$ 式中：P_s——试件在屈服阶段的最小载荷
强化阶段（eg 段）		试件受载超过屈服阶段后卸载，再加载（如图 1.1.1-30 b) 中的 k 点）而引起材料弹性极限升高和塑性降低的现象，叫做冷作硬化	
	强度极限 σ_b	试件承受最大载荷时的应力值。对应图 1.1.1-30 b) 中的 g 点	$\sigma_b=\frac{P_b}{A}$ 式中：P_b——试件断裂前的最大载荷
颈缩断裂阶段（gh段）		试件达到最大载荷后，局部截面明显收缩的现象（图 1.1.1-30 a）叫做颈缩现象。载荷迅速下降至 h 点，试件被拉断	
	伸长率（延伸率）δ	试件拉断后，标距内的残余变形与标距原长的比值（以百分比表示）	$\delta=\frac{l_1-l}{l}\times100\%$ 式中：l_1——试件断裂后标距长度 l——试件标距原长 对 $l=5d$ 和 $l=10d$ 两种试件相应地有 δ_5和δ_{10}。d——试件直径
	断面收缩率 ψ	试件拉断后，断裂处横截面面积的收缩量与原面积的比值（以百分比表示）	$\psi=\frac{A-A_1}{A}\times100\%$ 式中：A_1——试件断裂处最小横截面面积

至于其它各种金属材料的拉伸应力——应变曲线，可见图 1.1.1-31。

图 1.1.1-31 a) 中是 16Mn 钢与A_3钢的比较，两者形状相似，但 16Mn 钢的屈服极限及强度极限都相对较高。图 1.1.1-31 b）中是几种其它金属材料的应力——应变曲线。

有明显屈服现象的材料破坏时，有较大的塑性变形，伸长率$\delta>5\%$，称为塑性材料。无明显屈服区的材料破坏时，断口常呈较粗糙的脆性破坏且$\delta<5\%$，称为脆性材料。

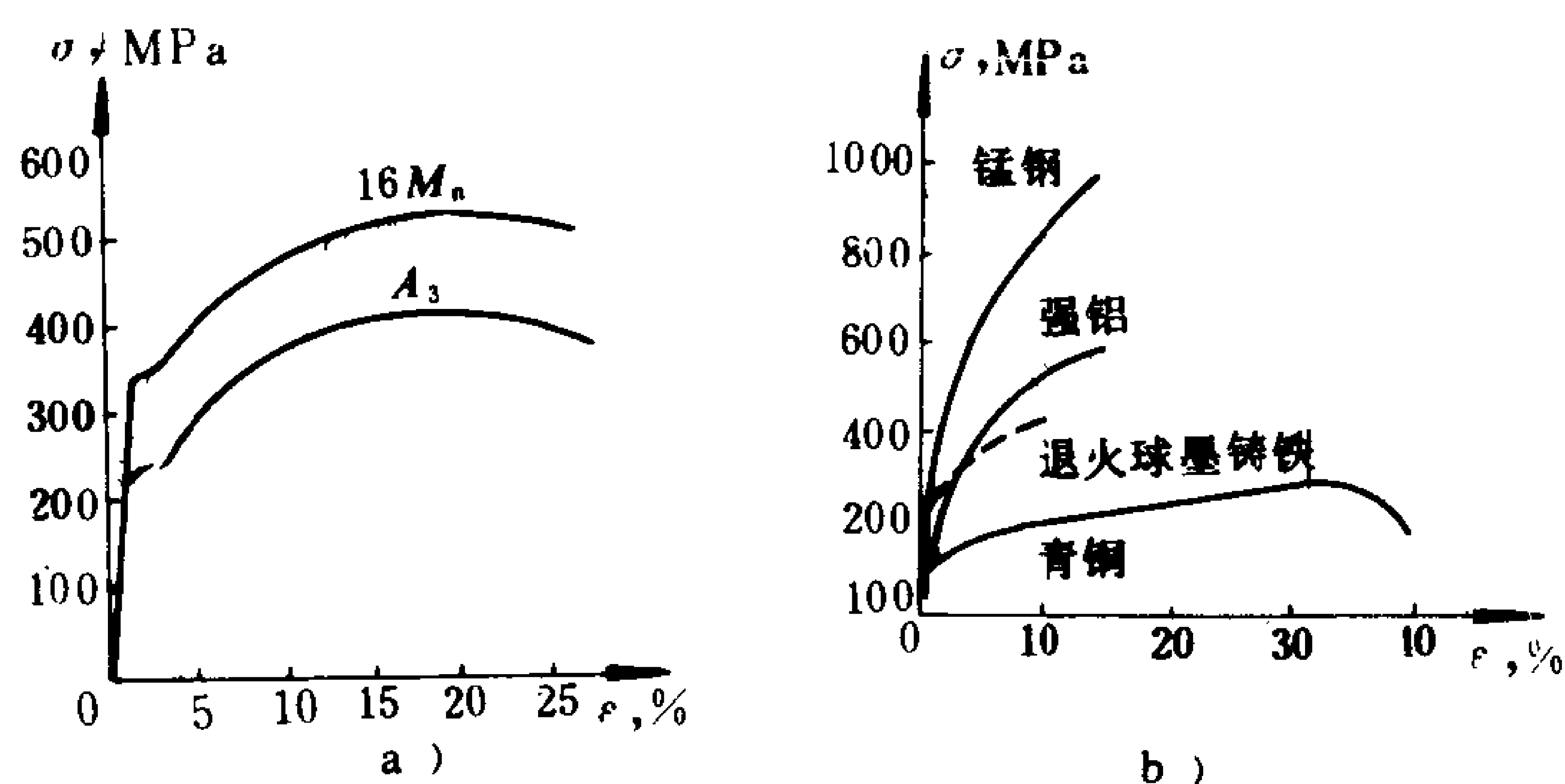


图 1.1.1-31 拉伸应力——应变曲线

a) 16 Mn 钢及 A 3 钢拉伸时的应力——应变曲线;

b) 几种常用金属拉伸时的应力——应变曲线

常用金属材料在拉伸和压缩时的机械性能数据，可参阅表 1.1.1-32。

表 1.1.1-32 常用材料在拉伸和压缩时的机械性能数据（常温、静载荷下）

材料		屈服极限 σ_s（包括$\sigma_{0.2}$）(MPa)	强度极限 (MPa)		延伸率 δ_5 (%)
			拉伸 σ_b	压缩 σ_{bc}	
普通碳素钢（$\phi \leq 40$ mm）	A3	235	372～392	—	25～27
优质碳素钢	45	353	598	—	16
弹簧钢	65,70	980	1128		$\sigma_{10}=8.9$
普通低合金钢（$\phi \leq 16$mm）	16 Mn	343	510	—	21
合金钢	40 Cr	784	980	—	9
灰铸铁（$\phi=30$ mm）	HT 25-47		245	785～980	—
	HT 15-33	—	147	588～785	—
球墨铸铁	QT 42-10	265	412	2～4 倍 σ_b	10
可锻铸铁	KT 35-10	196	343	1430	10
铸钢	ZG 25	235	441	—	20
硬铝合金	LY 11	235	412	—	18
铜合金	QA 19-2（软）	294	441	—	20～40
铸造铝合金	ZL 11	—	157	—	2
铸造铝锰青铜	ZQA 19-2	196	392	—	20

在比例极限范围内，剪应力τ与剪应变γ成正比，即 $\tau=G\gamma$ (1.1.1-64)

式中：G——材料的剪切弹性模量。

常用材料的E、G、μ 值的实验结果列于表 1.1.1-33。

表 1.1.1-33　　　　　　　　　常用材料的E、G和μ的约值

材料名称	E GPa	μ	G GPa
低碳钢、16 Mn 钢	2.0~2.2	0.25~0.33	80~81
普通低合金钢	2.0~2.2	0.25~0.33	
合金钢	1.9~2.2	0.24~0.33	81
灰铸铁	0.6~1.7	0.23~0.27	45
球墨铸铁	1.5~1.8	0.25~0.29	62~64
可锻铸铁	1.5~1.8	—	60
铸钢	1.75 ×100	0.265	80
碳铝合金	0.72	0.33	26~27
铜及其合金	0.74~1.30	0.31~0.42	40~46
混凝土	0.146~0.36	0.16~0.18	
橡胶	0.00008	0.47	
铅	0.17	0.42	7
弹簧钢	2.0~2.1		81~83

注：对于各向同性材料，也可用下式换算

$$G=\frac{E}{Z\ (1+\mu)}$$

7.3 许用应力与安全系数

构件的许用应力，是根据不同构件材料实验测得的极限应力，再除以一个大于 1 的系数n而得到的。系数n就是安全系数。对于塑性材料，取材料的屈服极限σ_s为极限应力；对于脆性材料，则取强度极限 σ_b 为极限应力，因而许用应力〔σ〕为：

塑性材料　　$[\sigma]=\frac{\sigma_s}{n_s}$　　(1.1.1-65)

脆性材料　　$[\sigma]=\frac{\sigma_b}{n_b}$　　(1.1.1-66)

式中：n_s——屈服安全系数；

n_b——抗拉强度安全系数。

安全系数的选取，应综合考虑工程上的各种具体情况，应包括各方面的因素，即载荷和应力计算的准确程度，材料的均匀性，构件本身的重要性，工作条件的好坏，以及所受载荷的不同类型等，以保证构件在工作时有必要的强度储备，防止构件在出现偶然的不利条件时发生破坏；但是，也不应过分强调安全，以致使构件的尺寸过大或材料的选择过优而影响经济性。

在常温静载荷情况下，工程上推荐的安全系数范围一般为：

塑性材料　　轧制或锻件　　$n_s=1.2\sim2.2$；

　　　　　　铸　　件　　$n_s=1.6\sim2.5$。

脆性材料　　　　　　　　$n_b=2.0\sim3.5$。

若构件承受动载荷或冲击载荷时，则 n_s 增大 15%～50%，n_b 增大 50%～100%。在工程应用上，构件横截面上最大应力超过许用应力 5%以内者，仍属于许可范围。

由于拉伸试验的数据较容易取得，因而名义计算弯曲、剪切、挤压、扭转时的许用应力，可通过它们与拉伸许用应力的近似关系参照表 1.1.1-34 来选取。

表 1.1.1-34　　弯曲、剪切、挤压、扭转许用应力与拉伸许用应力的近似关系

变形情况	弯曲 〔σ_w〕	剪切 〔τ_q〕	挤压 〔σ_{jy}〕	扭转 〔τ〕
塑性材料	(1.0~1.2)〔σ〕	(0.6~0.8)〔σ〕	(1.5~2.5)〔σ〕	(0.5~0.6)〔σ〕
脆性材料	1.0〔σ〕	(0.8~1.0)〔σ〕	(0.9~1.5)〔σ〕	(0.8~1.0)〔σ〕

表 1.1.1-35　　**基本变形构件的强度、刚度计算公式表**

变形形式	实例	受力与变形特点	计算公式	
			应力与变形	强度与刚度条件
轴向拉伸与压缩	气动夹具活塞杆（拉伸） 起货吊杆（压缩）	（1）在杆件两端作用有一对大小相等、方向相反并沿杆轴线作用的力 （2）杆的变形为沿轴线方向伸长或缩短 轴向拉伸： 轴向压缩： （3）应力为均匀分布	（1）任意横截面上的应力 $\sigma=\frac{N}{A}$ σ的正负根据变形判断，拉伸时为正，压缩时为负 （2）危险截面上的最大应力 $\sigma_{max}=\frac{N_{max}}{A}$ （3）纵向绝对伸长或缩短（虎克定律） $\Delta l=\frac{Nl}{EA}$ 使用上式时，N、E、A在l长度内需保持常量；否则需分段计算，然后求其代数和 （4）纵向线应变 $\varepsilon=\frac{\Delta l}{l}=\frac{l_1-l}{l}=\frac{\sigma}{E}$ （5）横向线应变 $\varepsilon_1=-\mu\varepsilon$	（1）强度条件 拉伸： $\sigma_{lmax}=\frac{N_{max}}{A}\leq[\sigma_l]$ 压缩： $\sigma_{ymax}=\left\|-\frac{N_{max}}{A}\right\|\leq[\sigma_y]$ 式中：$[\sigma_l]$、$[\sigma_y]$分别为拉伸与压缩许用应力 （2）刚度条件 $\Delta l\leq[\Delta l]$ 式中：$[\Delta l]$为轴向许用变

<table>
<tr><th rowspan="2">变形形式</th><th rowspan="2">实例</th><th rowspan="2">受力与变形特点</th><th colspan="2">计算公式</th></tr>
<tr><th>应力与变形</th><th>强度与刚度条件</th></tr>
<tr><td>剪切</td><td>螺栓</td><td>(1) 在垂直于杆件轴线方向作用有一对大小相等、方向相反，相邻很近的力
(2) 相邻两横截面沿力的作用方向相互错动
(3) 剪切面上切应力τ_q假定均匀分布
实际挤压面（以AB为直径的半圆柱面M）上挤压应力σ_{jy}假定均匀分布；在计算σ_{jy}时，挤压面积按直径平面ABCD计算
剪切面　实际挤压面M 挤压面积</td><td>(1) 剪切面上的应力
$\tau_q=\frac{Q}{A_q}=\frac{4Q}{\pi d^2}=\frac{4P}{\pi d^2}$
(2) 挤压面上的应力
$\sigma_{jy}=\frac{P_{jy}}{A_{jy}}=\frac{P}{dt}$
式中：A_q——剪切面积
A_{jy}——挤压面积</td><td>强度条件
剪切：
$\tau_q=\frac{Q}{A_q}\leqslant[\tau_q]$
挤压：
$\sigma_{jy}=\frac{P_{jy}}{A_{jy}}\leqslant[\sigma_{jy}]$
式中：$[\tau_q]$、$[\sigma_{jy}]$分别为剪切、挤压许用应力</td></tr>
</table>

续上表

变形形式	实例	受力与变形特点	计算公式：应力与变形	计算公式：强度与刚度条件
圆轴扭转	轧钢机传动轴AB 减速箱 传动轴 轧辊 A B 万向连轴节 m A m B	(1) 在与杆件轴线垂直的两平面内作用有一对相互平衡的力偶 (2) 变形为任意两横截面绕轴线相对转过一个角度，纵向无线应变 (3) 圆轴横截面上切应力τ方向与圆周相切并沿半径呈线性分布 (4) 外力偶矩m与转速、功率之间的关系由表 1.1.1-20 知 N单位为米制马力（PS）时： $m=7019\frac{N}{n}$ N·m N单位为千瓦（kW）时： $m=9549\frac{N}{n}$ N·m	(1) 任意横截面上任意点K的切应力 $\tau_\rho=\frac{M_n\rho}{I_n}$ 式中：M_n——K点所在截面上的扭矩 ρ——K点至圆心的距离 I_n——横截面对圆心的极惯矩，$I_n=\frac{\pi D^4}{32}$ (2) 危险截面上危险点的切应力 $\tau_{max}=\frac{(M_n)_{max}R}{I_n}=\frac{(M_n)_{max}}{W_n}$ 式中：W_n——抗扭截面模量 $W_n=\frac{\pi D^3}{16}$ (3) 变形 相距为l的两横截面相对转角（扭转角） $\varphi=\frac{M_n l}{GI_n}$ rad 或 $\varphi=57.3\frac{M_n l}{GI_n}$ ° 最大单位扭转角 $\theta_{max}=5730\frac{(M_n)_{max}}{GI_n}$ °/m (4) 虎克定律 $\tau=G\gamma$	(1) 强度条件 $\tau_{max}=\frac{(M_n)_{max}}{W_n}\leq[\tau]$ 实心圆轴直径 $D\geq1.72\sqrt[3]{\frac{(M_n)_{max}}{[\tau]}}$ 空心圆轴直径 $D\geq1.72\sqrt[3]{\frac{(M_n)_{max}}{[\tau](1-\alpha^4)}}$ 式中：$[\tau]$——剪切许用应力 $\alpha=d/D$ (2) 刚度条件 $5730\frac{(M_n)_{max}}{GI_n}\leq[\theta]$ 实心圆轴直径 $D\geq15.6\sqrt[4]{\frac{(M_n)_{max}}{G[\theta]}}$ 空心圆轴直径 $D\geq15.6\sqrt[4]{\frac{(M_n)_{max}}{G[\theta](1-\alpha^4)}}$ 式中：$[\theta]$——许用单位扭转角°/m

续上表

变形形式	实例	受力与变形特点	计算公式：应力与变形	计算公式：强度与刚度条件
平面弯曲	车轴	（1）在杆件纵向对称平面（ABCD）内作用有垂直于轴线方向的力 （2）杆的轴线在纵向对称平面内弯成曲线 中性层　中性轴　纵向对称平面 纵向对称平面——形心主惯性轴（如AD、BC）与轴线组成的平面，亦即主惯性平面 中性轴（如OO）——中性层（EFGH）与横截面交线，该轴将截面分为受拉区与受压区 （3）杆件横截面上正应力沿截面高度按直线规律分布 a） 切应力按抛物线规律分布 b）	（1）任意横截面上任意点K的正应力 $\sigma=\frac{My}{I_z}$ 式中：M——K点所在截面上的弯矩 y——K点至中性轴的距离 I_z——横截面对z轴的惯性矩， 计算时，M、y均用绝对值代入，应力正负根据K点位置而定，受拉区为正，受压区为负 （2）任意横截面上任意点E的切应力 $\tau=\frac{QS_z}{bI_z}$（剪切弯曲） 式中：Q——E点所在截面上的切力 b——E点处的截面宽度 S_z——E点以上或以下面积对中性轴的静矩 （3）危险截面上危险点的应力 $\sigma_{max}=\frac{M_{max}y_{max}}{I_z}=\frac{M_{max}}{W_z}$ 式中　y_{max}——上、下边缘点至中性轴的距离 W_z——抗弯截面模量，见表1.1.1-8 $\tau_{max}=\frac{Q_{max}S_{max}}{bI_z}$ 式中：S_{max}——中性轴以上或以下面积对中性轴的静矩 常用截面弯曲切应力计算公式可查表1.1.1-36 （4）变形（挠度y、转角θ）计算公式见表1.1.1-37	（1）强度条件 正应力： $\sigma_{max}=\frac{M_{max}}{W_z}\leq[\sigma]$ 式中：$[\sigma]$——弯曲许用应力，对薄壁型钢一般可用轴向拉伸时的许用应力 切应力： $\tau_{max}=\frac{Q_{max}S_{max}}{bI_z}\leq[\tau]$ 主应力： 主应力按平面应力状态进行校核 第三强度理论 $\sigma_{III}=\sqrt{\sigma^2+4\tau^2}\leq[\sigma]$ 第四强度理论 $\sigma_{IV}=\sqrt{\sigma^2+3\tau^2}\leq[\sigma]$ 式中：σ、τ为M、Q较大的截面上一点的正应力和切应力 （2）刚度条件 $y_{max}\leq[y]$ $\theta_{max}\leq[\theta]$

7.4 基本变形构件的强度、刚度计算公式与实例

7.4.1 计算公式

构件在基本变形时，有关强度和刚度计算公式，可参阅各有关表格。

1）基本变形构件的强度、刚度计算公式可参阅表 1.1.1-35。

2）常见截面的弯曲剪应力 τ_y 的计算方法可参见表 1.1.1-36。

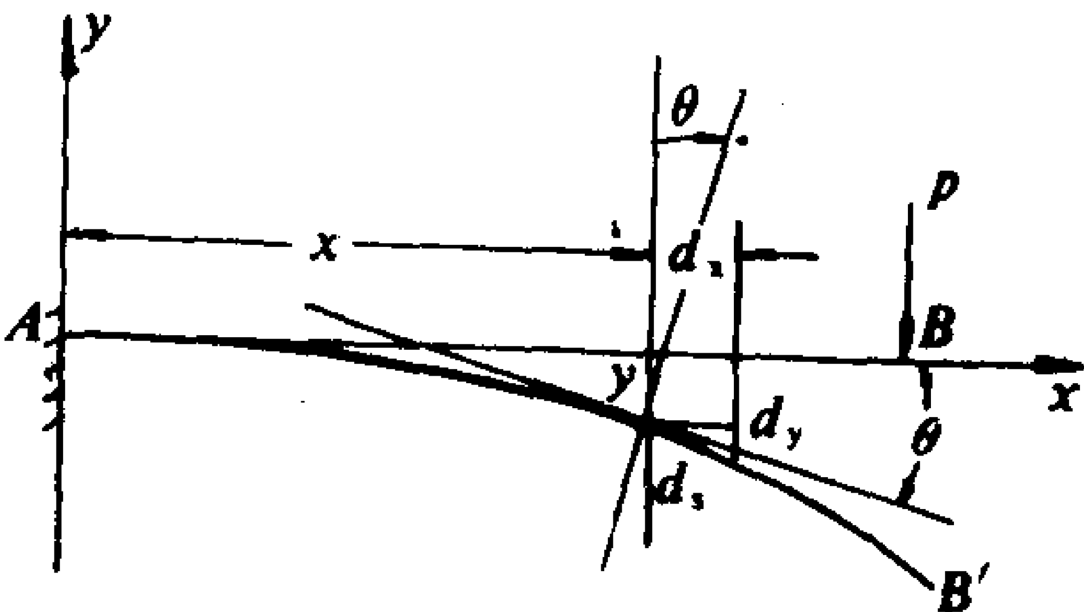


图 1.1.1-32 梁的变形

表 1.1.1-36 **常见截面的弯曲剪应力 τ_y 的计算公式**

序号	横断面形状与剪应力分布图	剪应力与最大剪应力计算公式
1		$\tau_y=\frac{3}{2}\cdot\frac{Q}{A}\left[1-4\left(\frac{y}{h}\right)^2\right]$ $\tau_{max}=\frac{3}{2}\cdot\frac{Q}{A}$ ($y=0$处)
2		$\tau_y=\frac{4}{3}\cdot\frac{Q}{A}\left[1-\left(\frac{y}{r}\right)^2\right]$ $\tau_{max}=\frac{4}{3}\cdot\frac{Q}{A}$ ($y=0$处)
3		$\tau_y=\frac{2Q}{A}\left[1-\left(\frac{y}{r}\right)^2\right]$ $\tau_{max}=\frac{2Q}{A}$ ($y=0$处)
4		$\tau_y=\frac{4Q}{3\pi(r_2^4-r_1^4)}(r_2^2-y^2)$ ($r_1\leq y\leq r_2$) $\tau_y=\frac{4Q}{3\pi(r_2^4-r_1^4)}[r_2^2+r_1^2-2y_2+\sqrt{(r_2^2-y^2)(r_1^2-y^2)}]$ ($0\leq y\leq r_1$) $\tau_{max}=\frac{Q}{A}\cdot\frac{4(r_2^2+r_2r_1+r_1^2)}{3(r_2^2+r_1^2)}$ ($y=0$处)
5		$\tau_y=\frac{3Q}{2(b_2h_2^3-b_1h_1^3)}(h_2^2-4y^2)\left(\frac{h_1}{2}\leq y\leq\frac{h_2}{2}\right)$ $\tau_y=\frac{3Q}{2(b_2h_2^3-b_1h_1^3)}\left(\frac{b_2h_2^2-b_1h_1^2}{t}-4y^2\right)\left(0\leq y\leq\frac{h_1}{2}\right)$ $\tau_{max}=\frac{Q}{A}\cdot\frac{3(b_2h_2^2-b_1h_1^2)(h_2b_2-h_1b_1)}{2(b_2h_2^3-b_1h_1^3)t}$ ($y=0$处)

3）梁的弯曲变形及其计算表

弯曲变形用挠度y与转角θ来度量，如图 1.1.1-32 所示。

（1）挠度y是梁的截面形心相对于原来位置的垂直位移。位移方向和坐标轴正向一致时挠度为正，反之为负。图 1.1.1-32 中 AB 表示梁变形前的轴线，$\widehat{AB'}$表示梁变形后的轴线，称为挠曲线，挠度y随截面位置x而变化的关系式$y=f(x)$，称为挠曲线方程。

表 1.1.1-37

等截面静定梁的支反力、力矩及变形的计算公式表

序号	梁的剪力图和弯矩图	支反力	弯矩方程	挠曲线方程	梁端转角	最大挠度
1	M, R_A, P, B, θ, l, P, Pl	$R_A=P$ $M_A=Pl$	$M(x)=P(x-l)$	$y=-\frac{Pl^2}{6EI}\left(3\frac{x^2}{l^2}-\frac{x^3}{l^3}\right)$	$\theta_B=-\frac{Pl^2}{2EI}$	在$x=l$处 $y_{max}=-\frac{Pl^3}{3EI}$
2	M_A, A, R_A, P, B, a, l, P, Pa	$R_A=P$ $M_A=Pa$	$M(x)=P(x-a)$ $(0\leq x\leq a)$ $M(x)=0$ $(a\leq x\leq l)$	$y=-\frac{Px^2}{6EI}(3a-x)$ $(0\leq x\leq a)$ $y=-\frac{Pa^2}{6EI}(3x-a)$ $(a\leq x\leq l)$	$\theta_B=-\frac{Pa^2}{2EI}$	在$x=l$处 $y_{max}=-\frac{Pa^2}{6EI}(3l-a)$
3	M_A, A, R_A, q, B, l, ql, $\frac{ql^2}{2}$	$R_A=ql$ $M_A=\frac{1}{2}ql^2$	$M(x)=q\left(lx-\frac{l^2+x^2}{2}\right)$	$y=-\frac{ql^4}{24EI}\left(6\frac{x^2}{l^2}-4\frac{x^3}{l^3}+\frac{x^4}{l^4}\right)$	$\theta_B=-\frac{ql^3}{6EI}$	在$x=l$处 $y_{max}=-\frac{ql^4}{8EI}$

序号	梁的剪力图和弯矩图	支反力	弯矩方程	挠曲线方程	梁端转角	最大挠度
4	P; θ_A; θ_B; R_A; R_B; $\frac{l}{2}$; $\frac{l}{2}$; $\frac{P}{2}$ ⊕; $\frac{P}{2}$ ⊖; $\frac{Pl}{4}$ ⊕	$R_A=R_B=\frac{P}{2}$	$M(x)=\frac{Px}{2}$ $\left(0\leq x\leq\frac{1}{2}\right)$	$y=-\frac{Pl^3}{48EI}\left(3\frac{x}{l}-4\frac{x^3}{l^3}\right)$ $\left(0\leq x\leq\frac{1}{2}\right)$	$\theta_A=-\theta_B=-\frac{Pl^2}{16EI}$	在$x=\frac{l}{2}$处 $y_{max}=-\frac{Pl^3}{48EI}$
5	P; A; B; R_A; R_B; a; b; l; $\frac{Pb}{l}$ ⊕; $\frac{Pa}{l}$ ⊖; $\frac{Pab}{l}$ ⊕	$R_A=\frac{Pb}{l}$ $R_B=\frac{Pa}{l}$	$M(x)=\frac{Pbx}{l}$ $(0\leq x\leq a)$ $M(x)=\frac{Pbx}{l}-P(x-a)$ $(a\leq x\leq 1)$	$y=-\frac{Pbx}{6EIl}(l^2-x^2-b^2)$ $(0\leq x\leq a)$ $y=-\frac{Pb}{6EIl}\left[(l^2-b^2)x-x^3+\frac{l}{b}(x-a)^3\right]$ $(a\leq x\leq l)$	$\theta_A=-\frac{Pab(l+b)}{6EIl}$ $\theta_B=\frac{Pab(l+a)}{6EIl}$	若$a>b$，在$x=\sqrt{\frac{l^2-b^2}{3}}$处 $y_{max}=-\frac{Pb}{9\sqrt{3}EIl}\cdot(l^2-b^2)^{3/2}$； 在$x=\frac{l}{2}$处 $y_{\frac{l}{2}}=-\frac{Pb}{48EI}(3l^2-4b^2)$
6	A; C; m_0; B; R_A; R_B; a; b; l; $\frac{m_0}{l}$; $\frac{m_0b}{l}$; $\frac{m_0a}{l}$	$R_A=\frac{m_0}{l}$ $R_B=\frac{m_0}{l}$	$M(x)=-\frac{m_0}{l}x$ $(0\leq x\leq a)$ $M(x)=m_0\left(1-\frac{x}{l}\right)$ $(a\leq x\leq l)$	$y=\frac{m_0x}{6EIl}(l^2-3b^2-x^2)$ $(0\leq x\leq a)$ $y=-\frac{m_0(l-x)}{6EIl}[l^2-3a^2-(l-x)^2]$ $(a\leq x\leq l)$	$\theta_A=\frac{m_0}{6EIl}(l^2-3b^2)$ $\theta_B=\frac{m_0}{6EIl}(l^2-3a^2)$ $\theta_C=-\frac{m_0}{6EIl}(3a^2+3b^2-l^2)$	在$x=\sqrt{\frac{l^2-3b^2}{3}}$处 $y_{1max}=\frac{m_0(l^2-3b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EIl}$ 在$x=\sqrt{\frac{l^2-3a^2}{3}}$处 $y_{2max}=-\frac{m_0(l^2-3a^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EIl}$

序号	梁的剪力图和弯矩图	支 反 力	弯 矩 方 程	挠 曲 线 方 程	梁 端 转 角	最 大 挠 度
7		$R_A=R_B=\frac{1}{2}ql$	$M(x)=\frac{qx}{2}(l-x)$ $M_{max}=\frac{ql^2}{8}$	$y=-\frac{qx}{24EL}(l^3-2lx^2+x^3)$	$\theta_A=-\theta_B=-\frac{ql^3}{24EI}$	在$x=\frac{l}{2}$处 $y_{max}=-\frac{5ql^4}{384EI}$
8		$R_A=q\frac{b}{l}\left(\frac{b}{2}+c\right)$ $R_B=q\frac{b}{l}\left(\frac{b}{2}+a\right)$	$M(x)=\frac{qb}{l}\left(\frac{b}{2}+c\right)x$ $(0\leq x\leq a)$ $M(x)=\frac{qb}{l}\left(\frac{b}{2}+c\right)x-\frac{q}{2}(x-a)^2$ $(a\leq x\leq a+b)$ $M_{max}=\frac{qb}{l}\left(\frac{b}{2}+c\right)\left[a+\frac{b}{2l}\left(\frac{b}{2}+c\right)\right]$ $\left(在x=a+\frac{b}{l}\left(\frac{b}{2}+c\right)处\right)$	$y=-\frac{qbx}{6EIl}\left(\frac{b}{2}+c\right)\times\left[l^2-\left(\frac{b}{2}+c\right)^2-\frac{1}{4}b^2-x^2\right]$ $(0\leq x\leq a)$ $y=-\frac{qb}{6EIl}\left\{\left(\frac{b}{2}+c\right)x\left[l^2-\left(\frac{b}{2}+c\right)^2-\frac{1}{4}b^2-x^2\right]+\frac{1}{4b}(x-a)^4\right\}$ $(a\leq x\leq a+b)$ $y=-\frac{qb}{6EIl}(a+b)(l-x)\cdot\left[l^2-\left(a+\frac{b}{2}\right)^2-\frac{1}{4}b^2-(l-x)^2\right]$ $(a+b\leq x\leq l)$	$\theta_A=-\frac{qb}{6EIl}\left(\frac{b}{2}+c\right)\times\left[l^2-\left(\frac{b}{2}+c\right)^2-\frac{b^2}{4}\right]$ $\theta_B=\frac{qb}{6EIl}(a+b)\cdot\left[l^2-\left(a+\frac{b}{2}\right)^2-\frac{b^2}{4}\right]$	在$a\leq x\leq a+b$ 令$y'=0$，求出x的数值解，代入y方程即得y_{max}
9		$R_A=R_B=P$	$M(x)=Px$ $(0\leq x\leq a)$ $M=Pa$ $(a\leq x\leq l-a)$	$y=-\frac{Px}{6EI}[3a(l-a)-x^2]$ $(0\leq x\leq a)$ $y=-\frac{Pa}{6EI}[3x(l-x)-a^2]$ $(a\leq x\leq l-a)$	$\theta_A=-\theta_B=-\frac{Pa}{2EI}(l-a)$	在$x=\frac{l}{2}$处 $y_{max}=-\frac{Pa}{24EI}(3l^2-4a^2)$

续上表

序号	梁的切力图和弯矩图	支反力	弯矩方程	挠曲线方程	梁端转角	最大挠度
10		$R_A=\frac{Pa}{l}$ $R_B=\frac{P(a+l)}{l}$	$M(x)=-\frac{Pax}{l}$ $(0\leq x\leq l)$ $M(x)=-P(l+a-x)$ $(l\leq x\leq l+a)$	$y=\frac{Pal^2}{6EI}\left(\frac{x}{l}-\frac{x^3}{l^3}\right)$ $(0\leq x\leq l)$ $y=\frac{P}{6EIl}[al^2x-ax^3$ $+(a+l)(x-l)^3]$ $(l\leq x\leq l+a)$	$\theta_A=\frac{Pal}{6EI}$ $\theta_B=-\frac{Pal}{3EI}$ $\theta_D=-\frac{Pa}{6EI}(2l+3a)$	在$x=l+a$处 $y_{max}=-\frac{Pa^2}{3EI}(l+a)$ 在$x=\frac{1}{2}$处 $y_{1/2}=\frac{Pal^2}{16EI}$
11		$R_A=\frac{1}{2}\cdot\frac{qa^2}{l}$ $R_B=qa\left(1+\frac{a}{2l}\right)$	$M(x)=-\frac{qa^2}{2l}x$ $(0\leq x\leq l)$ $M(x)=-\frac{q}{2}(l+a-x)^2$ $(l\leq x\leq l+a)$	$y=\frac{qa^2l^2}{12EI}\left(\frac{x}{l}-\frac{x^3}{l^3}\right)$ $(0\leq x\leq l)$ $y=-\frac{qa^2}{12EIl}\Big[-l^2x+x^3$ $-\frac{(a+2l)(x-l)^3}{a}$ $-\frac{l}{2a^2}(x-l)^4\Big]$ $(l\leq x\leq l+a)$	$\theta_A=\frac{qa^2l}{12EI}$ $\theta_B=-\frac{Pa^2l}{6EI}$ $\theta_D=-\frac{qa^2}{6EI}(l+a)$	在$x=\frac{1}{2}$处 $y_{1/2}=\frac{qa^2l^2}{32EI}$ 在$x=l+a$处 $y_{max}=-\frac{qa^3}{24EI}(3a+4l)$
12		$R_A=R_B=P$	$M(x)=-Px$ $(0\leq x\leq a)$ $M=-Pa$ $(a\leq x\leq l+a)$	$y=-\frac{P}{6EI}[a^2(2a+3l)$ $-3a(a+l)x+x^3]$ $(0\leq x\leq a)$ $y=\frac{P}{6EI}[3a(a+l)x$ $-a^2(2a+3l)$ $-x^3+(x-a)^3]$ $(a\leq x\leq l+a)$	$\theta_A=-\theta_B=\frac{Pal}{2EI}$ $\theta_E=-\theta_D$ $=\frac{Pa(l+a)}{2EI}$	$y_D=y_E=-\frac{Pa^2(2a+3l)}{6EI}$ 在$x=a+\frac{l}{2}$处 $y_0=\frac{Pal^2}{8EI}$

注：式中x为从梁左端起量的坐标。

（2）转角θ为梁的截面绕中性轴相对原来位置转过的角度，以逆时针转向为正，反之为负。由于梁的变形通常很小，转角θ可近似等于挠曲线$y=f(x)$的一阶导数，即

$$\theta \approx \mathrm{tg}\theta = \frac{dy}{dx} = y' \qquad (1.1.1\text{-}67)$$

（3）当梁的变形很小时，梁的挠度和转角是与载荷成正比的，因此同时有几个载荷作用于梁时，可用叠加法来计算梁的变形，即分别先求出各个载荷单独作用时产生的变形，然后将它们的代数值相加，得出总的变形。各种简单载荷作用下等截面静定梁的支反力及变形计算公式，列于表 1.1.1-37 中。

7.4.2 应用实例

1）气缸盖拉紧螺栓尺寸如图 1.1.1-33 所示。螺栓共四根，承受总拉力$P=6174$kN。螺栓材料的许用应力〔σ〕=118MPa，$E=200$GPa，考虑超载系数$Z=1.5$，校核螺栓的强度，并计算其伸长变形。

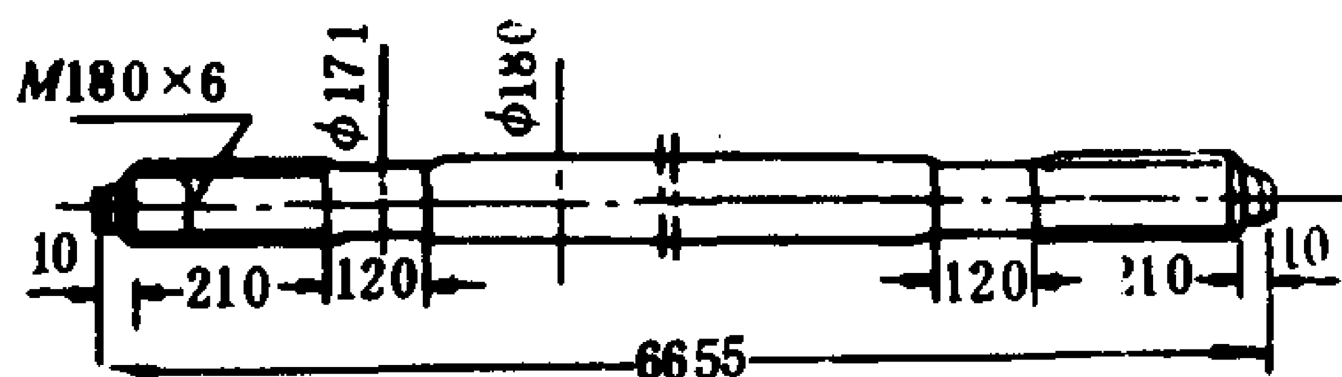


图 1.1.1-33

拉伸强度校核

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} = \frac{Z \times P/4}{\frac{\pi}{4} d_{min}^2} = 101\text{MPa} <$$

〔σ〕，即强度满足要求。

伸长变形计算

$$\Delta l = \Sigma \frac{N_i l_i}{E A_i} = 0.29 \quad \text{cm}$$

2）液压机拉杆与滑块通过斜楔连接，尺寸见图 1.1.1-34。已知拉杆承受拉力$P=980$kN，拉杆与楔的材料相同，〔σ〕=118MPa，〔τ〕=78.5MPa，〔σ_{jy}〕=162MPa，校核拉杆的拉伸，剪切，与挤压强度。

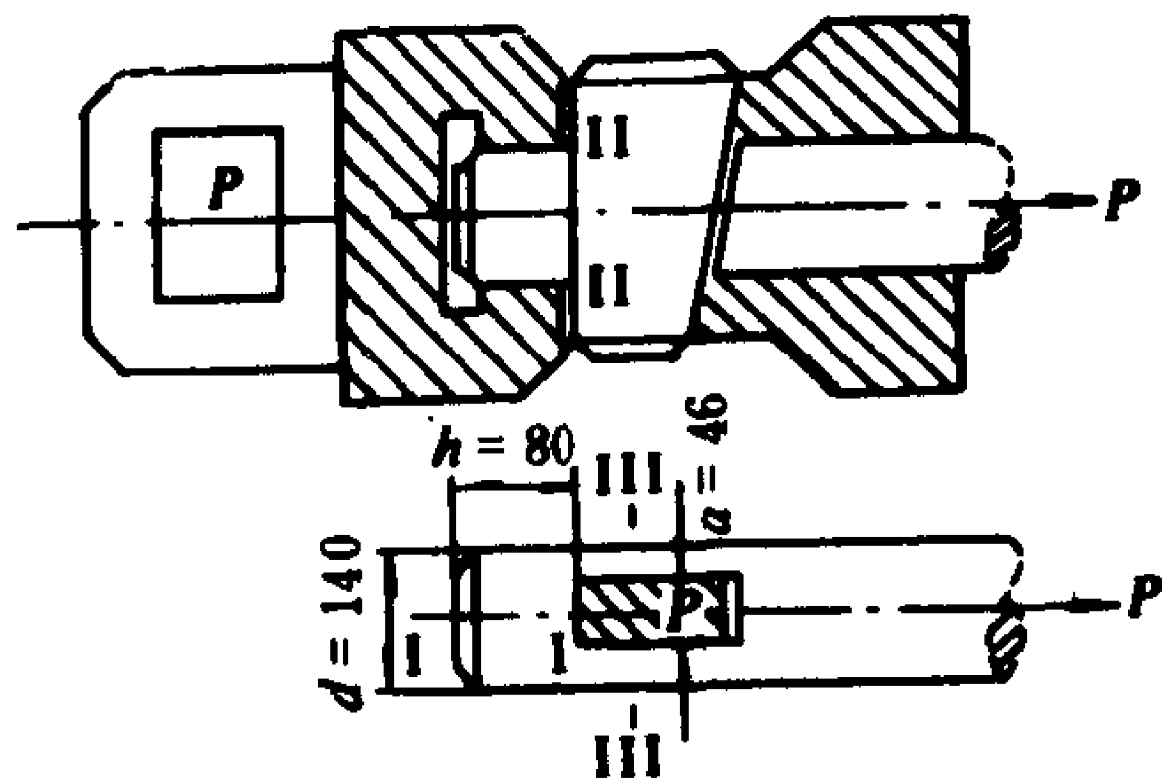


图 1.1.1-34

拉伸强度校核

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d^2 - da} = 109\text{MPa} <$$

〔σ〕。拉伸强度合格。

剪切强度校核

$\tau = P/2hd = 43.7$MPa<〔τ〕 剪切强度合格。

挤压强度校核：

$\sigma_{jy} = \dfrac{P}{da} = 152$MPa<〔$\sigma_{jy}$〕 挤压强度合格。

3）万向轴尺寸如图 1.1.1-35 所示，材料的许用应力〔τ〕=265MPa，许用扭转角〔θ〕$=0.5°/m$，$G=80$GPa，确定能传递的最大扭矩 M_{nmax}。按强度要求

$$M < 〔\tau〕 \cdot W_n = 2635 \text{ kN·m}$$

按刚度要求

$M<\ [\theta]\cdot\frac{GI_n}{57.3\phi}=1284\ \mathrm{kN\cdot m}$。

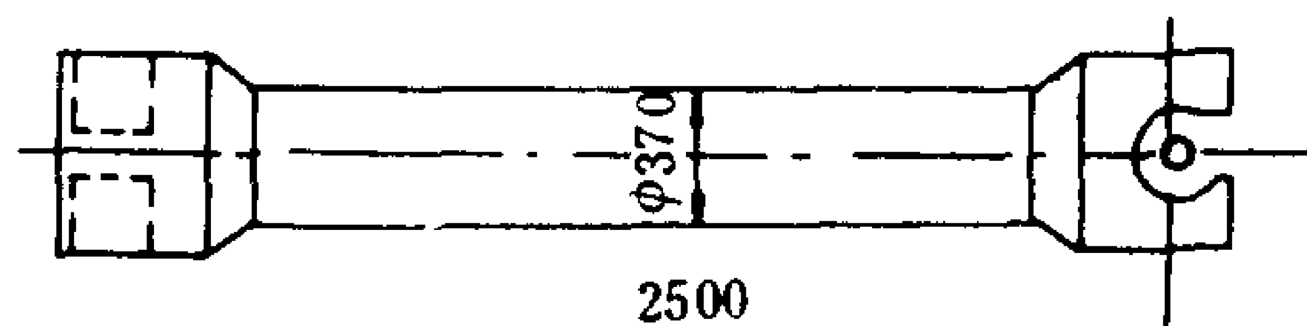


图 1.1.1-35

4)柴油机活塞与连杆相连接的空心活塞销如图 1.1.1-36 所示，活塞销全长 80 mm，已知连杆的最大推力为 $P_{max}=47.6\mathrm{kN}$。销子与连杆接触段载荷为均匀分布，在销座部分，销子表面所受到的压力，经实验证明为三角形分布。设活塞销内外直径比$\frac{d}{D}=0.588$，材料的许用应力 $[\sigma]=118\mathrm{MPa}$，$[\tau]=69\sim88\mathrm{MPa}$，按弯曲强度计算活塞销的内外径，并作剪应力强度校核。

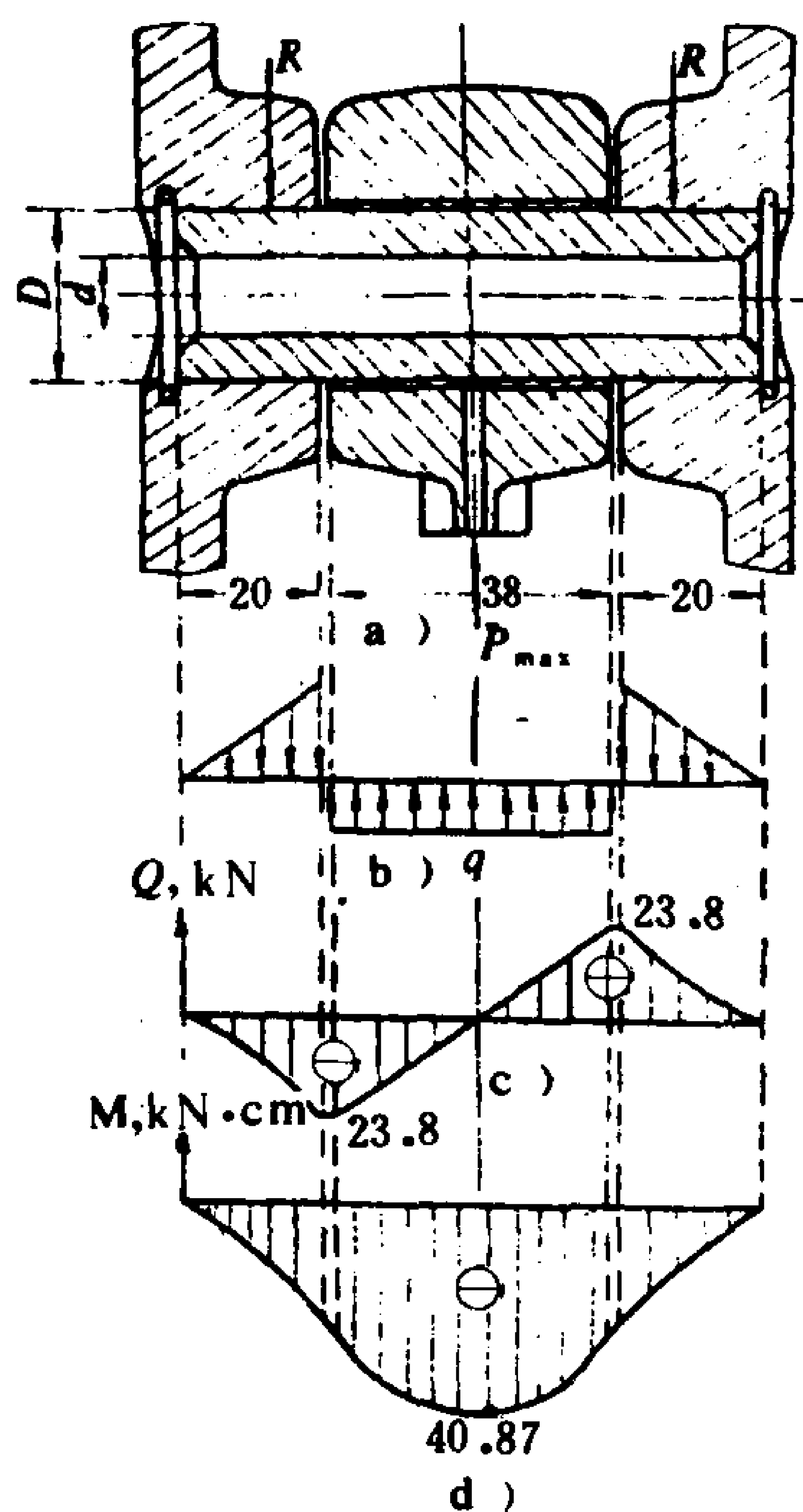


图 1.1.1-36

（1）外力计算：先将活塞销简化成图b）中的梁，活塞销与连杆的接触面长$a=3.8\mathrm{cm}$ 求得均布载荷为

$$q=\frac{P_{max}}{a}=12.53\mathrm{kN/cm}$$

销座接触部份长$C=2\mathrm{cm}$，载荷呈三角形分布，合力为：

$$R=\frac{P_{max}}{2}=23.8\mathrm{kN}$$

（2）内力图及最大剪力 Q_{max} 和最大弯矩 M_{max}。

剪力图如图c）所示，最大剪力 $Q_{max}=23.8\mathrm{kN}$ 弯矩图如图 d）所示，最大弯矩 $M_{max}=40.87\mathrm{kN\cdot cm}$。

（3）设计截面：

$$W_z=\frac{\pi}{32}D^3\ (1-\alpha^4)\ =0.088D^3$$

由 $W_z\geq\frac{M_{max}}{[\sigma]}$ 解出 $D\geq3.4\mathrm{cm}$，$d=0.588\times D=2.0\mathrm{cm}$

（4）剪应力强度校核：

截面面积 $A=\frac{\pi}{4}\ (b^2+d^2)\ =5.03\ \ \mathrm{cm}^2$

查上节图表得：

$$\tau_{max}=\frac{Q_{max}}{A}\cdot\frac{4\ (r_2^2r_2r_1+r_1^2)}{3(r_2^2+r_1^2)}=77\mathrm{MPa}$$，即在 $[\tau]$ 范围内。

8 组合变形情况下构件的强度计算——应力状态分析与强度理论

处于组合变形载荷下工作的构件，在进行强度计算时，不能再用基本变形的强度条件，而必须进行应力状态分析和应用组合变形的强度理论。

8.1 应力状态基本概念

由构件截面上的应力概念可知，受力构件上通过同一点的各个不同方向的截面上的应力是各不相同的。构件内某一点的应力随截面的变化情况称为该点的应力状态。通常通过一点截取一个很小的六面体，称为单元体来进行分析，以表明该点在不同方向截面上的应力变化规律，并由此确定最大应力值及其所在截面的方向，然后根据强度理论建立强度条件。

8.1.1 主平面、主应力、应力状态的分类

1)主平面与主应力　根据应力状态理论，在单元体上总可以找到三个互相垂直的不存在剪应力的平面，称为主平面。主平面上的正应力，称为主应力。这三个互相垂直的主平面上的主应力，分别用 σ_1、σ_2、σ_3来表示，其中 σ_1为通过该点所有截面上正应力的最大值，σ_3为最小值。

2)应力状态的种类　当单元体上只有一个主应力时（即其它两个主平面方向的正应力均为零），这种应力状态称为单向应力状态。当单元体上有两个主应力或三个主应力时，分别称为二向应力状态（平面应力状态）和三向应力状态（空间应力状态），有关应力状态不同种类的实例，见表 1.1.1-38。

表 1.1.1-38　　**应力状态种类及其实例**

应力状态种类	应力状态的图示	实例
单向应力状态	σ A σ 或 σ A σ σ B σ 或 σ B σ	车轴 P P A B C D
二向应力状态、（平面应力状态）	σ_1 σ_2 A σ_2 σ_1 或 σ_1 σ_2 A σ_2 σ_1	高压气瓶 P

应力状态种类	应力状态的图示	实例
二向应力状态（平面应力状态）	或	汽车的主传动轴及方向盘操纵杆 方向盘操纵杆 主传动轴
三向应力状态（空间应力状态）		元钢拉拔 拉杆
		厚壁容器

8.1.2 剪应力互等定理

单元体的两个互相垂直平面上，垂直于两平面交线的剪应力，必成对存在，且数值相等，方向均指向交线，或背离交线，如图 1.1.1-37 中所示，其关系为

$$\tau_{yx}=-\tau_{xy} \quad 或简写成 \quad \tau_y=-\tau_x \tag{1.1.1-68}$$

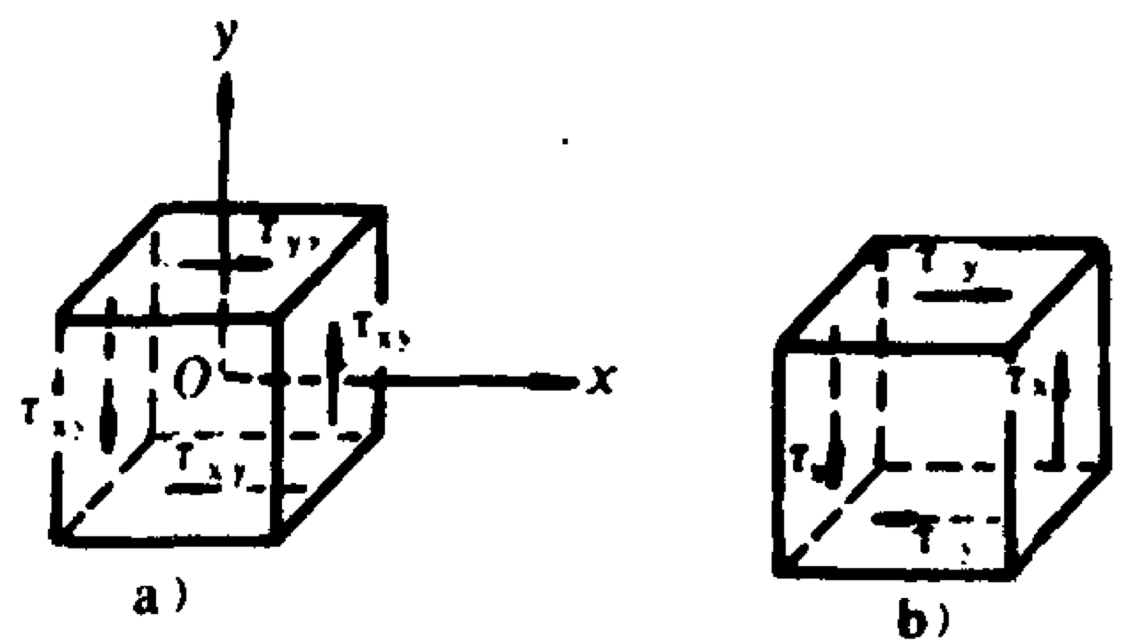


图 1.1.1-37 单元体上剪应力恒等情况

剪应力的方向，规定为取平面外法线转向剪应力平面的方向，顺时针为正，反之为负。

8.1.3 平面应力状态下的应力计算

常用船舶机械的受力构件，较常见的

是平面应力状态。可用解析法来确定平面应力状态下单元体各截面的应力变化规律。如图1.1.1-38所示的单元体 $abcd$，在垂直 $abcd$ 的方向上无应力，即为平面应力状态。

应用静力分析中的平衡条件，可以得出：

1)垂直于 $abcd$（主平面）的任意斜截面上的应力为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_\alpha&=\frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}+\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos2\alpha-\tau_x\sin2\alpha\\ \tau_\alpha&=\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\sin2\alpha+\tau_x\cos2\alpha\end{aligned}\right\}\quad(1.1.1\text{-}69)$$

式中，σ_x、σ_y 为作用在单元体 $abcd$ 上的正应力；τ_x 为剪应力；α角为任意方向斜截面 de 与截面 ad 间的夹角；即该两截面外法线（x 与 n）间的夹角，其转向由 x 轴量起，取反时针转向为正。

2)通过取任意截面上 $\tau_\alpha=0$ 这个条件，即可解出主平面的方向，其外法线与 x 轴的夹角为 α_0。

$$\alpha_0=-\frac{1}{2}\mathrm{tg}^{-1}\frac{2\tau_x}{\sigma_x-\sigma_y};\quad(1.1.1\text{-}70)$$

根据此式可得出主应力的大小为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1\\ \sigma_2\end{aligned}\right\}=\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\right)^2+\tau_x^2}\quad(1.1.1\text{-}71)$$

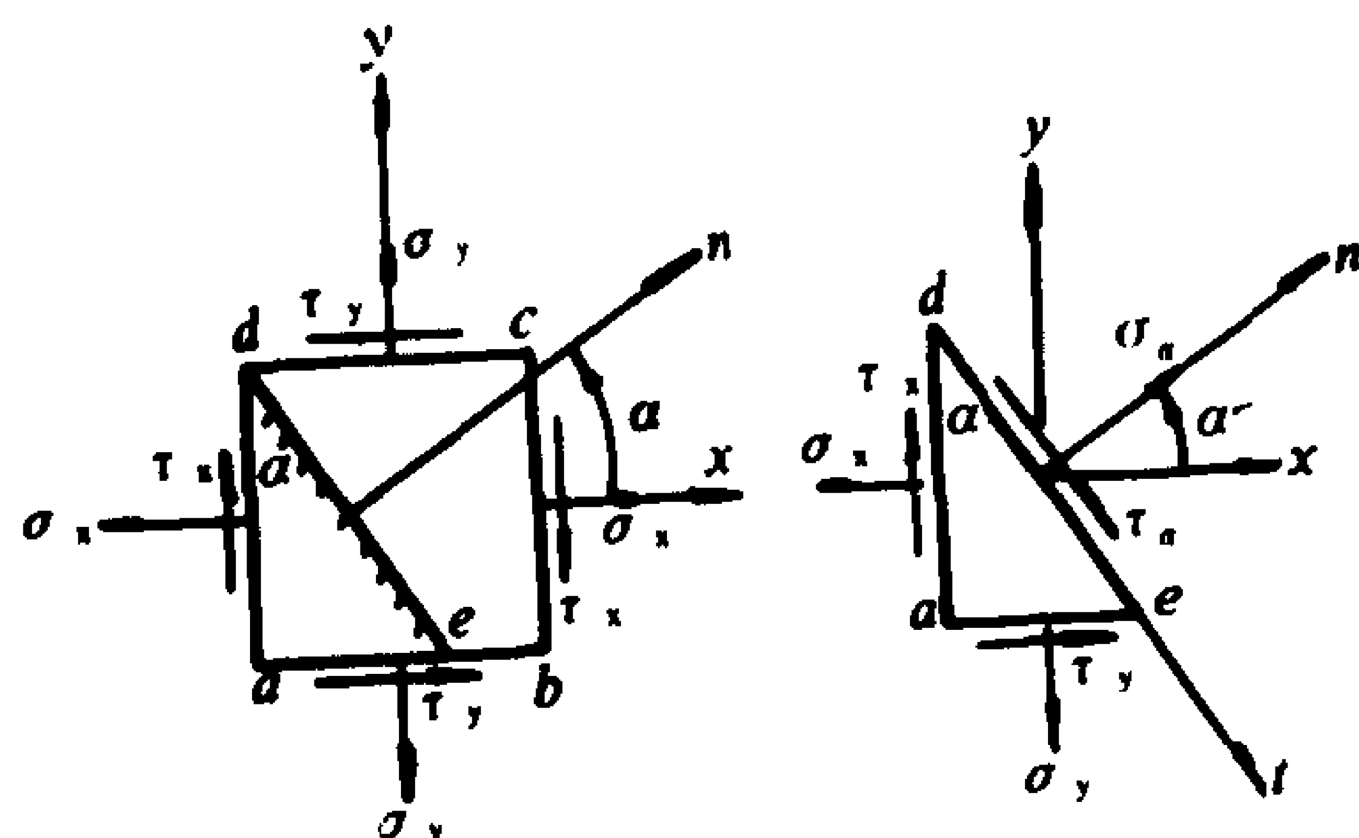


图 1.1.1-38　单元体各截面应力变化情况

3)对任意截面上的剪应力求极值，可得最大剪应力作用面的方向与 x 轴的夹角β。

$$\beta=\frac{1}{2}\mathrm{tg}^{-1}\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2\tau_x}\quad(1.1.1\text{-}72)$$

这个作用面的位置，与主平面之间的夹角为±45°。

求得剪应力的极值为：

$$\left.\begin{aligned}\tau_{max}\\ \tau_{min}\end{aligned}\right\}=\pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\right)^2+\tau_x^2}\quad(1.1.1\text{-}73)$$

将上面的公式，应用于平面应力状态的各种情况，所得的结果，列于表 1.1.1-39 中。

4)应用举例　发动机的传动轴，如图 1.1.1-39 所示。已知在 S-S 截面上，由定额扭矩引起的剪应力$\tau=16.2$MPa，自重引起的最大弯曲正应力 $\sigma=24.5$MPa，求 S-S 截面上危险

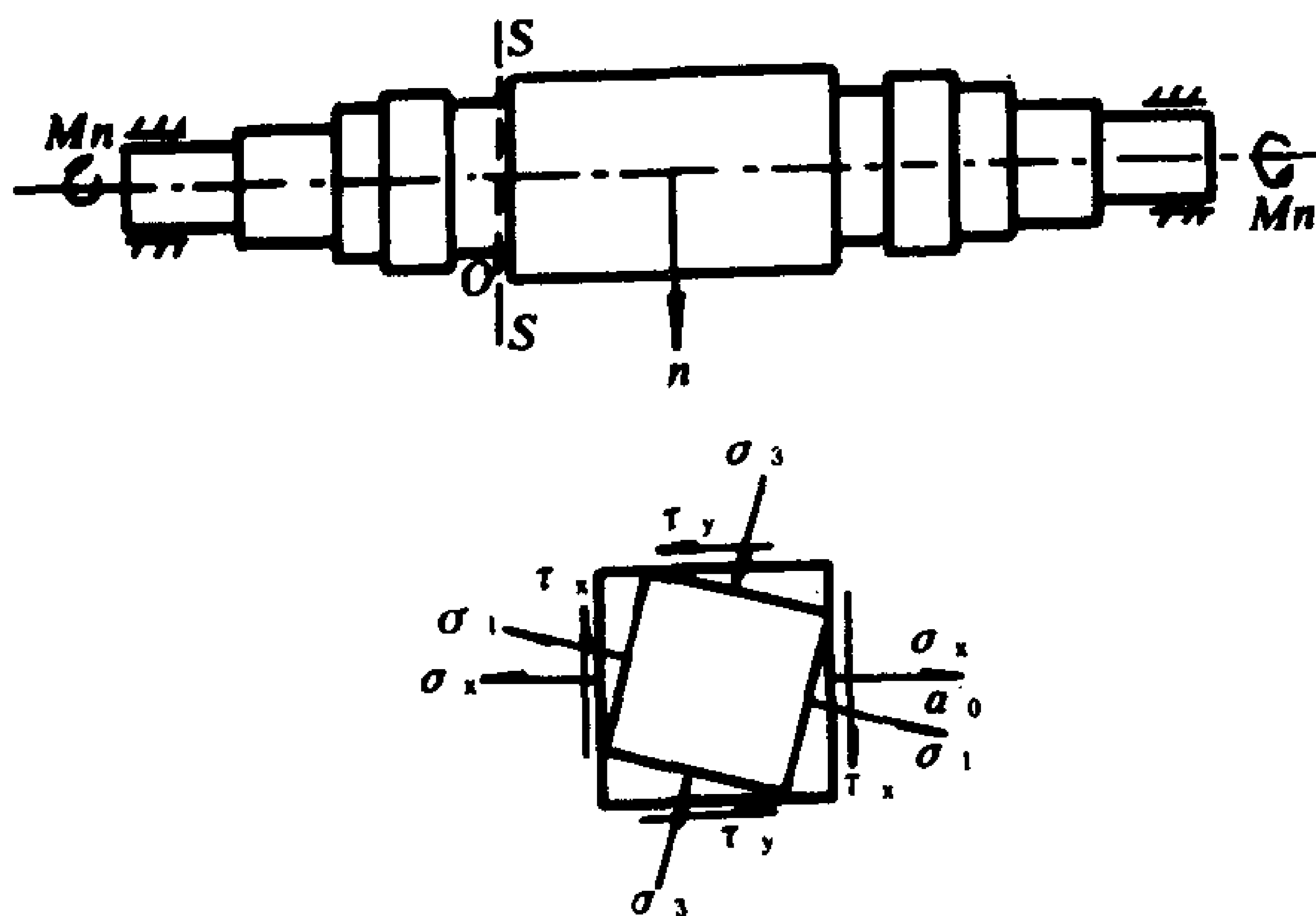


图 1.1.1-39　发动机轴

表 1.1.1-39　　平面应力状态下斜截面上的应力、主应力、最大切应力公式

序号	应力状态	斜截面上的应力（σ_α、τ_α）	主应力（σ_1、σ_2、σ_3）及主方向（α_0）	最大切应力（τ_{max}）及其位置（β）
1	单向应力状态	$\sigma_\alpha=\sigma_1\cos^2\alpha=\frac{1}{2}\sigma_1(1+\cos2\alpha)$ $\tau_\alpha=\frac{1}{2}\sigma_1\sin2\alpha$	$\sigma_1=\sigma_{max}$、$\sigma_2=\sigma_3=0$ $\alpha_0=0$	$\left.\begin{matrix}\tau_{max}\\\tau_{min}\end{matrix}\right\}=\pm\frac{1}{2}\sigma_1$ $\beta=45^\circ$
2	二向应力状态（纯剪）	$\sigma_\alpha=-\tau_x\sin2\alpha$ $\tau_\alpha=\tau_x\cos2\alpha$	$\sigma_1=\sigma_{max}=\tau_x$ $\sigma_2=0$ $\sigma_3=\sigma_{min}=-\tau_x$ $\alpha_0=-45^\circ$	$\left.\begin{matrix}\tau_{max}\\\tau_{min}\end{matrix}\right\}=\pm\tau_x$ $\beta=0$

续上表

序号	应力状态	斜截面上的应力（σ_α、τ_α）	主应力（σ_1、σ_2、σ_3）及主方向（α_0）	最大切应力（τ_{max}）及其位置（β）
3	二向应力状态（已知主平面上的应力），设$\sigma_1>\sigma_2$	$\sigma_\alpha=\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cos2\alpha$ $\tau_\alpha=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\sin2\alpha$	$\sigma_1=\sigma_{max}$ $\sigma_2\neq0$ $\sigma_3=0$ $\alpha_0=0$	$\left.\begin{matrix}\tau_{max}\\ \tau_{min}\end{matrix}\right\}=\pm\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}$ $\beta=45°$
4	二向应力状态〔轴向拉（压）与纯剪的合成〕	$\sigma_\alpha=\frac{\sigma_x}{2}+\frac{\sigma_x}{2}\cos2\alpha-\tau_x\sin2\alpha$ $\tau_\alpha=\frac{\sigma_x}{2}\sin2\alpha+\tau_x\cos2\alpha$	$\left.\begin{matrix}\sigma_1=\sigma_{max}\\ \sigma_3=\sigma_{min}\end{matrix}\right\}=\frac{\sigma_x}{2}\pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2+\tau_x^2}$ $\sigma_2=0$ $\alpha_0=-\frac{1}{2}tg^{-1}\frac{2\tau_x}{\sigma_x}$	$\left.\begin{matrix}\tau_{max}\\ \tau_{min}\end{matrix}\right\}=\pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2+\tau_x^2}$ $\beta=\frac{1}{2}tg^{-1}\frac{\sigma_x}{2\tau_x}$

点的主应力及最大剪应力。

剪应力最大位置及正应力最大位置，均位于 S-S 截面的上端点（图示位置），因而这就是危险点位置。分析点的单元体受力图，属于平面应力状态，与表中序号 4 所列情况一致，可代入公式计算如下：

$$\left.\begin{matrix}\sigma_1\\ \sigma_3\end{matrix}\right\}=\frac{\sigma_x}{2}\pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2+\tau_x^2}=\begin{matrix}32.6\,\text{MPa}\ (\sigma_2=0)\\ -8.1\text{MPa}\end{matrix}$$

$$\alpha_0=-\frac{1}{2}\text{tg}^{-1}\frac{2\tau_\alpha}{\sigma_x}=26°26'$$

$$\tau_{max}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2+\tau_x^2}=20.3\,\text{MPa}$$

8.1.4 三向应力状态时的最大应力　广义虎克定律

1）三向应力状态时的最大应力

三向应力状态的分析比较复杂，但结果比较清楚。现将结果介绍于下，如图 1.1.1-40 所示。若已知三向应力状态的单元体的三个主方向和主应力 σ_1、σ_2、σ_3的大小，则任意斜截面上正应力 σ 与 τ 的计算公式如下：

$$\sigma=\sigma_1\cos^2\alpha_1+\sigma_2\cos^2\alpha_2+\sigma_3\cos^2\alpha_3$$

$$\tau=\sqrt{\sigma_1^2\cos\alpha_1^2+\sigma_2^2\cos^2\alpha_2+\sigma_3^2\cos^2\alpha_3-\sigma^2}$$

(1.1.1-74)

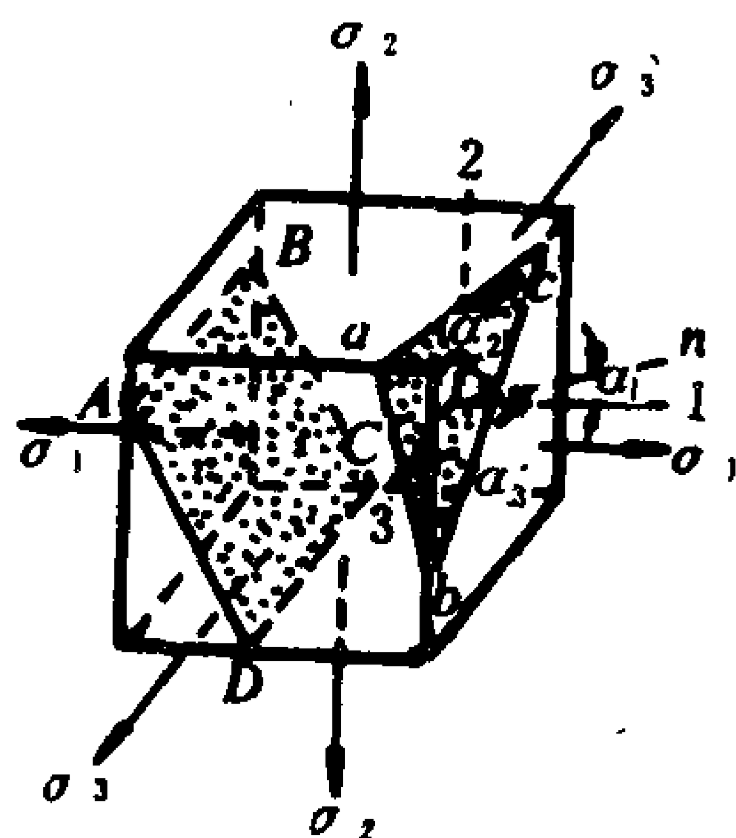


图 1.1.1-40　三向应力状态最大剪应力

式中，α_1、α_2、α_3——为该斜截面的外法线与主应力 σ_1、σ_2、σ_3方向间的夹角。

研究结果表明：

$\sigma_{max}=\sigma_1$；　　　$\sigma_{min}=\sigma_3$；

$\tau_{max}=\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)$。其作用平面垂直于 σ_2作用的主平面，与主应力 σ_1方向间的夹角为：

$\alpha=45°$

2）广义虎克定律　在材料的比例极限范围内，三向应力状态时应力和应变之间的关系称为广义虎克定律。表示应力与应变的公式列于表 1.1.1-40 中。

表 1.1.1-40　　　　广义虎克定律

应力状态		以应力表示应变	以应变表示应力
单向应力状态	σ_1 ← □ → σ_1	纵向主应变 $\varepsilon_1=\frac{\sigma_1}{E}$ 在垂直于主应变ε_1方向上的横向应变 $\varepsilon_2=\varepsilon_3=-\mu\varepsilon_1=-\mu\frac{\sigma_1}{E}$	主应力 $\sigma_1=E\cdot\varepsilon_1$

应力状态		以应力表示应变	以应变表示应力
二向应力状态	已知主应力或主应变	主应变 $\varepsilon_1=\frac{1}{E}(\sigma_1-\mu\sigma_2)$ $\varepsilon_2=\frac{1}{E}(\sigma_2-\mu\sigma_1)$ $\varepsilon_3=-\frac{\mu}{E}(\sigma_1+\sigma_2)$	主应力 $\sigma_1=\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1+\mu\varepsilon_2)$ $\sigma_2=\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2+\mu\varepsilon_1)$ $\sigma_3=0$
	已知一般应力或应变	应变分量 $\varepsilon_x=\frac{1}{E}(\sigma_x-\mu\sigma_y)$ $\varepsilon_y=\frac{1}{E}(\sigma_y-\mu\sigma_x)$ $\varepsilon_z=-\frac{\mu}{E}(\sigma_x+\sigma_y)$ $\gamma_{xy}=\frac{\tau_{xy}}{G}$ $\gamma_{xz}=\gamma_{yz}=0$	应力分量 $\sigma_x=\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)$ $\sigma_y=\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)$ $\tau_{xy}=G\gamma_{xy}$ $\sigma_z=\tau_{zx}=\tau_{zy}=0$
三向应力状态	已知主应力或主应变	主应变 $\varepsilon_1=\frac{1}{E}[\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)]$ $\varepsilon_2=\frac{1}{E}[\sigma_2-\mu(\sigma_3+\sigma_1)]$ $\varepsilon_3=\frac{1}{E}[\sigma_3-\mu(\sigma_1+\sigma_2)]$	主应力 $\sigma_1=2G\varepsilon_1+\lambda_e$ $\varepsilon_2=2G\varepsilon_2+\lambda_e$ $\sigma_3=2G\varepsilon_3+\lambda_e$ 式中：$e=\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3$ $\lambda=\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$
	已知一般应力或应变	应变分量 $\varepsilon_x=\frac{1}{E}[\sigma_x-\mu(\sigma_y+\sigma_z)]$ $\varepsilon_y=\frac{1}{E}[\sigma_y-\mu(\sigma_z+\sigma_x)]$ $\varepsilon_z=\frac{1}{E}[\sigma_z-\mu(\sigma_x+\sigma_y)]$ $\gamma_{xy}=\frac{\tau_{xy}}{G}$ $\gamma_{yz}=\frac{\gamma_{yz}}{G}$ $\gamma_{zx}=\frac{\tau_{zx}}{G}$	应力分量 $\sigma_x=2G\varepsilon_x+\lambda\varepsilon$ $\sigma_y=2G\varepsilon_y+\lambda\varepsilon$ $\sigma_z=2G\varepsilon_z+\lambda\varepsilon$ $\tau_{xy}=G\gamma_{xy}$ $\tau_{yz}=G\gamma_{yz}$ $\tau_{zx}=G\gamma_{zx}$

8.2 强度理论

材料处于复杂应力状态时，建立强度条件的基本方法是分析静载荷作用下杆件的破坏形式。假设一种破坏为主要原因，然后针对这种破坏形式，通过简单试验所得的材料强度指标来建立复杂应力状态下的强度条件，这就是强度理论的依据。

8.2.1 构件受力之后的几种主要破坏形式

金属材料构件，在工作中的破坏形式，有下列几种常见的类型。

1)塑性破坏（韧性破坏）　在静载荷作用下，构件断裂前，有明显的塑性变形，并且一般发生在最大切应力作用面附近。这是金属材料构件最常见的破坏形式。

2)脆性破坏（断裂破坏）　在静载荷作用下，构件断裂前，无明显的塑性变形，且破坏面比较粗糙，一般发生在最大正（拉）应力作用的截面上。

3)疲劳破坏　在交变的重复载荷作用下的构件，经过相当多次数的载荷循环之后，发生突然断裂，即使构件是塑性材料制成，在破坏前也无显著的塑性变形，这种破坏称为疲劳破坏。疲劳破坏是轮机工程中经常出现的一种重要破坏形式。疲劳强度计算的内容可详见本手册有关的章节。

4)蠕变破坏　在高温工作下的构件，在一定的温度和一定的应力作用下，随着载荷作用时间的延长，会导致变形不断增长，形成不能恢复的塑性变形，这种失效形式，称为蠕变，可详见本手册中有关章节。

8.2.2 常用的强度理论及其适用范围

对于常温、静载荷作用下的构件及目前常用的强度理论及强度条件计算公式，可参考表1.1.1-41。

表1.1.1-41　**强度理论及其相当应力的表达式**

强度理论名称	基本假设	相当应力表达式	强度条件
第一强度理论（最大拉应力理论）	最大拉应力 σ_{max} 是引起材料破坏的原因	$\sigma_I=\sigma_1$	$\sigma_I\leq[\sigma]$
第二强度理论（最大伸长线变形理论）	最大伸长线变形 ε_{max} 是引起材料破坏的原因	$\sigma_{II}=\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)$	$\sigma_{II}\leq[\sigma]$
第三强度理论（最大切应力理论）	最大切应力 τ_{max} 是引起材料破坏的原因	$\sigma_{III}=\sigma_1-\sigma_3$	$\sigma_{III}\leq[\sigma]$
第四强度理论（形状改变比能理论）	形状改变比能① μ_ϕ 是引起材料破坏的原因	$\sigma_{IV}=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-\sigma_1\sigma_2-\sigma_2\sigma_3-\sigma_3\sigma_1}$ $=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]}$	$\sigma_{IV}\leq[\sigma]$
莫尔理论（修正后的第三强度理论）	决定材料塑性破坏或断裂的原因主要是由于某一截面上切应力达到某一极限，同时还与该截面的正应力有关	$\sigma_M=\sigma_1-\nu\sigma_3$②	$\sigma_M\leq[\sigma]$

① 比能——指单位体积的弹性变形能；

② $\nu=\frac{拉伸强度极限}{压缩强度极限}$。

各种强度理论的选用，与构件的材料、受力情况等有关，参考范围可见表1.1.1-42。

表 1.1.1-42　　　　　　选用强度理论的参考范围

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">应力状态</th><th rowspan="2">塑性材料（低碳钢、非淬硬中碳钢、退火球墨铸铁、铜、铝等）</th><th rowspan="2">极脆材料（淬硬工具钢、陶瓷等）</th><th colspan="2">拉伸与压缩强度极限不等的脆性材料或低塑性材料（铸铁、淬硬高强度钢、混凝土等）</th></tr>
<tr><th>精确计算</th><th>简化计算</th></tr>
<tr><td>单向应力状态</td><td>简单拉伸</td><td rowspan="5">第三强度理论
或
第四强度理论</td><td rowspan="5">第一强度理论</td><td rowspan="5">莫尔强度理论</td><td rowspan="4">第一强度理论</td></tr>
<tr><td rowspan="5">二向应力状态</td><td>二向拉伸应力（如薄壁压力容器）</td></tr>
<tr><td>一向拉伸、一向压缩，其中拉应力较大（如拉伸和扭转或弯曲和扭转等联合作用）</td></tr>
<tr><td>拉伸、压缩应力相等（如圆轴扭转）</td></tr>
<tr><td>一向拉伸、一向压缩，其中压应力较大（如压缩和扭转等联合作用）</td><td>近似采用第二强度理论</td></tr>
<tr><td>二向压缩应力（如压配合的被包容件的受力情况）</td><td colspan="4">第三强度理论或第四强度理论</td></tr>
<tr><td rowspan="2">三向应力状态</td><td>三向拉伸应力（如拉伸具有能产生应力集中的尖锐沟槽的杆件）</td><td colspan="4">第一强度理论</td></tr>
<tr><td>三向压缩应力（点接触或线接触的接触应力，如齿轮齿面间的接触应力）</td><td colspan="4">第三强度理论或第四强度理论</td></tr>
</table>

8.3　组合变形杆件应用强度理论进行强度计算实例

蜗杆蜗轮减速装置中的蜗杆，受力情况如图 1.1.1-41 所示，其分度圆直径 $d_t=64\text{mm}$，根圆直径 $d=44\text{mm}$，蜗轮分度直径 $D_t=320\text{mm}$ 蜗杆材料的$\sigma_s=353\text{MPa}$，安全系数取 $n=1.8$，蜗杆中央截面允许挠度 $[y]=0.0025d_t$，蜗杆承受最大力矩 $m=204\text{N}\cdot\text{m}$，蜗轮轴上的扭矩 $m_n=1534\text{N}\cdot\text{m}$，要求校核蜗杆的强度和刚度。

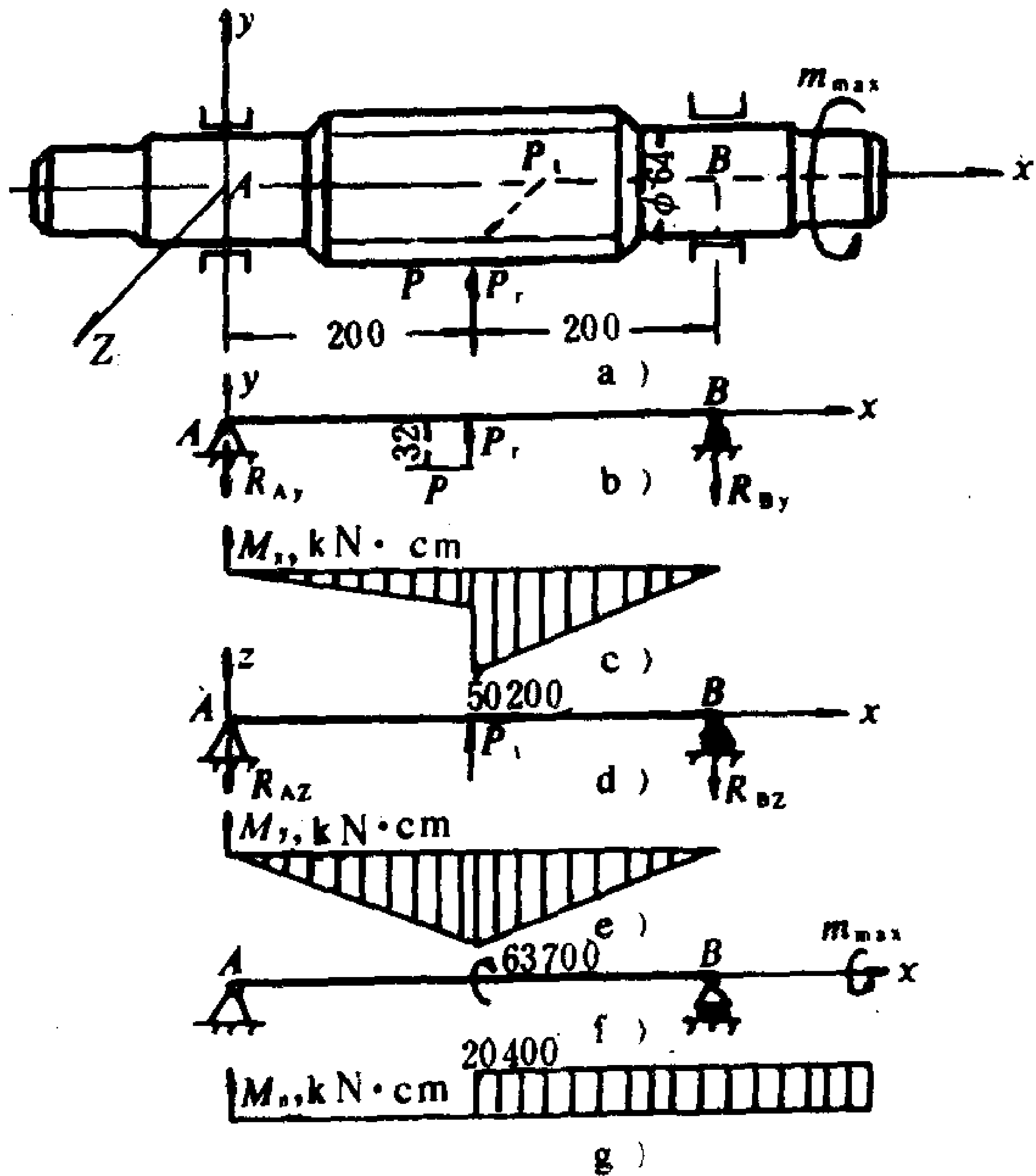


图 1.1.1-41　弯扭组合变形的蜗杆

校核依下列步骤进行

1)计算外力

蜗杆圆周力

$$P_t=\frac{2m_{\max}}{d_t}=6370\text{N}$$

蜗杆轴向力

$$P=\frac{2m_n}{D_f}=9600\text{N}$$

蜗杆径向力

$$P_r=P\text{tg}\alpha=9600\times\text{tg}20^\circ=3496\text{N}$$

2)内力计算

（1）垂直平面（xAy）内的弯矩图如图 c）所示。

$$R_{By}=\frac{P_r\times20+P\times3.2}{40}=2510\text{ N};\quad R_{Ay}=\frac{P_r\times20-P\times3.2}{40}=980\text{N}$$

$$M_{z\max}=-R_{By}\times20=-50200\text{N}\cdot\text{cm}$$

（2）水平平面（xAz）内的弯矩图如图 e 所示。

$$R_{AZ}=R_{BZ}=1/2P_t=3185\text{N}$$

$$M_{y\max}=-R_{AZ}\times20=-63700\text{N}\cdot\text{cm}$$

（3）合成弯矩

$$M_{\max}=\sqrt{M_{z\max}^2+M_{y\max}^2}=81100\text{N}\cdot\text{cm}$$

（4）扭矩如图 g 所示

$$M_n=m_{\max}=204\text{N}\cdot\text{m}=20400\text{ N}\cdot\text{cm}$$

3)校核强度（选用第三强度理论）

$$\sigma_{III}=\frac{1}{W}\sqrt{M_{\max}^2+M_n^2}=100\text{ MPa}$$

$$[\sigma]=\sigma_s/n=353/1.8=196\text{MPa},\quad \sigma_{III}<[\sigma]$$

强度合格。

4)蜗杆刚度校核

由 $$y_{\max}=\frac{Ql^3}{48EI}=\frac{\sqrt{P_t^2+P_r^2}\cdot l^3}{48E\times\pi d^2/64}=0.00255\text{cm}$$

$$[y]=0.0025d_{f1}=0.0025\times6.4=0.016\text{cm}$$

$$y_{\max}<[y]$$

刚度合格。

9 压杆的稳定性

9.1 压杆稳定的基本概念

受轴向压力作用的细长直杆，当压力 P 稍大于某一临界值 P_c 时，受到微小的横向干扰力，就会使压杆脱离直线平衡位置而突然变弯，以致变形急剧增加，导致整个杆件折断，这就是所谓压杆失稳破坏。这类受压杆件，例如活塞杆、连杆、桁架中的受压弦杆，均须保证其稳定性，只有压力 P 小于某一个临界值 P_c 时，它们才能保持平衡状态，稳定地工作。载荷的临界值 P_c 是压杆稳定平衡与不稳定平衡的分界点，临界力 P_c 的计算是压杆稳定计算的主要问题。

9.2 细长杆临界载荷的计算

9.2.1 在材料比例极限范围内的临界载荷

1)欧拉公式　压杆临界载荷的数值，与压杆的长度、横截面尺寸、形状及材料的弹性模量E有关。如图 1.1.1-42 所示的两端铰支的等截面压杆，在材料的比例极限 σ_p 的范围内保持弹性稳定的临界载荷计算公式(通常称为欧拉公式) 为:

$$P_c=\frac{\pi^2 EI_{min}}{l^2} \qquad (1.1.1\text{-}75)$$

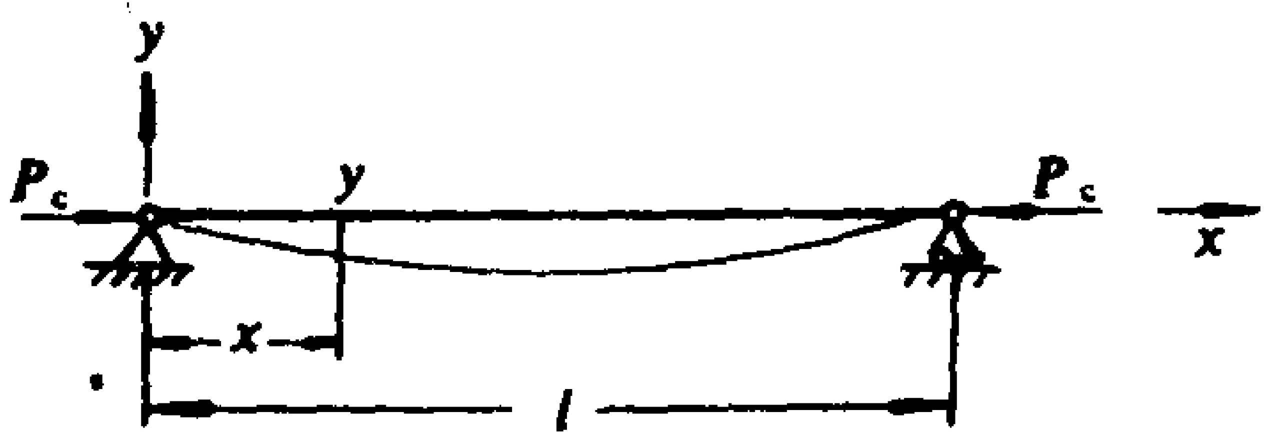


图 1.1.1-42　二端铰支等截面压杆

式中：EI_{min}——压杆最小的抗弯刚度。

2)两端不同支承时的欧拉公式　当压杆两端支承情况不同时，临界力 P_c 也随之变化，将支承不同影响考虑在内之后所得临界力的公式为:

$$P_c=\frac{\pi^2 EI_{min}}{(\mu l)^2} \qquad (1.1.1\text{-}76)$$

临界应力的公式为:

$$\sigma_c=\frac{P_c}{A}=\frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \qquad (1.1.1\text{-}77)$$

式中：μ——考虑支承情况的长度系数;

λ——压杆的柔度，其表达式为:

$$\lambda=\frac{\mu l}{i_{min}}，\text{其中 } i_{min}=\sqrt{\frac{I_{min}}{A}}。$$

表 1.1.1-43　常见不同支承压杆临界力的欧拉公式

支端情况	两端铰支	一端固定另端铰支	两端固定	一端固定另端自由
失稳时挠曲线形状	P_c, B, D, C, A, L, 0.5L C、D—挠曲线拐点	P_c, B, A, L C—挠曲线拐点	P_c, B, C, A, L, 0.7L	P_c, L, 2L
临界力 P_c 欧拉公式	$P_c=\frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$P_c\approx\frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2}$	$P_c=\frac{\pi^2 EI}{(0.5L)^2}$	$P_c=\frac{\pi^2 EI}{(2L)}$
长度系数 μ	$\mu=1$	$\mu\approx0.7$	$\mu=0.5$	$\mu=2$

3)公式适用范围　由于临界力公式的推导，是在材料弹性范围内进行，因此，公式只适用于压杆的压应力不超过比例极限 σ_p 的情况，其适用范围为:

$$\sigma_c=\frac{\pi^2 E}{\lambda^2}\leqslant\sigma_p \qquad (1.1.1\text{-}78)$$

亦即：$\lambda \geq \pi\sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}$；取$\lambda_p = \pi\sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}$。

对A_3钢而言，$E=200GPa$，$\sigma_p=196MPa$，代入上式得：

$$\lambda_p = \pi\sqrt{\frac{200\times10^3}{196}} \approx 100$$

所以，用A_3钢制成的压杆，只有在其柔度 $\lambda \geq \lambda_p = 100$ 时，也就是所谓细长杆或大柔度杆的条件下，才能应用上述临界载荷 P_c 的公式。

9.2.2 中柔度杆的临界应力

压杆的柔度愈小，其稳定性愈好，试验表明，当柔度小于一定的数值 λ_0时，强度又成为主要问题，此时，承压能力由屈服强度来决定。工程上称 $\lambda < \lambda_0$的杆为小柔度杆或短粗杆。但实际上较常见的压杆，柔度介于 λ_0及 λ_p 之间，这类压杆，称为中柔度杆。

中柔度杆的临界应力，按下列经验公式进行计算。

$$\sigma_c = a - b\lambda \quad (1.1.1\text{-}79)$$

式中：a、b 是只与材料性能有关的常数，其单位为 MPa。

几种常用材料的 a、b、λ_0及λ_p 值列于表 1.1.1-44 中。

表 1.1.1-44 **常用材料a、b、λ_0及λ_p值**

材料	a	b	λ_p	λ_0
A 3 钢 $\sigma_s=235MPa$ $\sigma_b \geq 372MPa$	304	1.12	100	61.4
优质碳钢 $\sigma_s=306MPa$ $\sigma_b \geq 470 MPa$	460	2.57	100	60
硅钢 $\sigma_s=353 MPa$ $\sigma_b \geq 510 MPa$	577	3.74	100	60
铬钼钢	980	5.29	55	
硬铝	392	3.26	50	
铸铁	331.9	1.453		
松木	39.2	0.199	59	

综上所述，压杆稳定计算方法，可按其柔度值，分成三类，并按不同的方法分别处理。不同范围的临界应力，随柔度变化的情况，如图 1.1.1-43 所示，对于中柔度杆或大柔度杆，其临界应力，均随柔度增加而减少，当 $\lambda \geq \lambda_p$ 时，按欧拉计算临界应力，其值小于比例极限 σ_p，当$\lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_p$ 时，用经验公式，其临界应力高于 σ_p，当$\lambda < \lambda_0$时，压杆属于粗杆，只须进行强度校核。

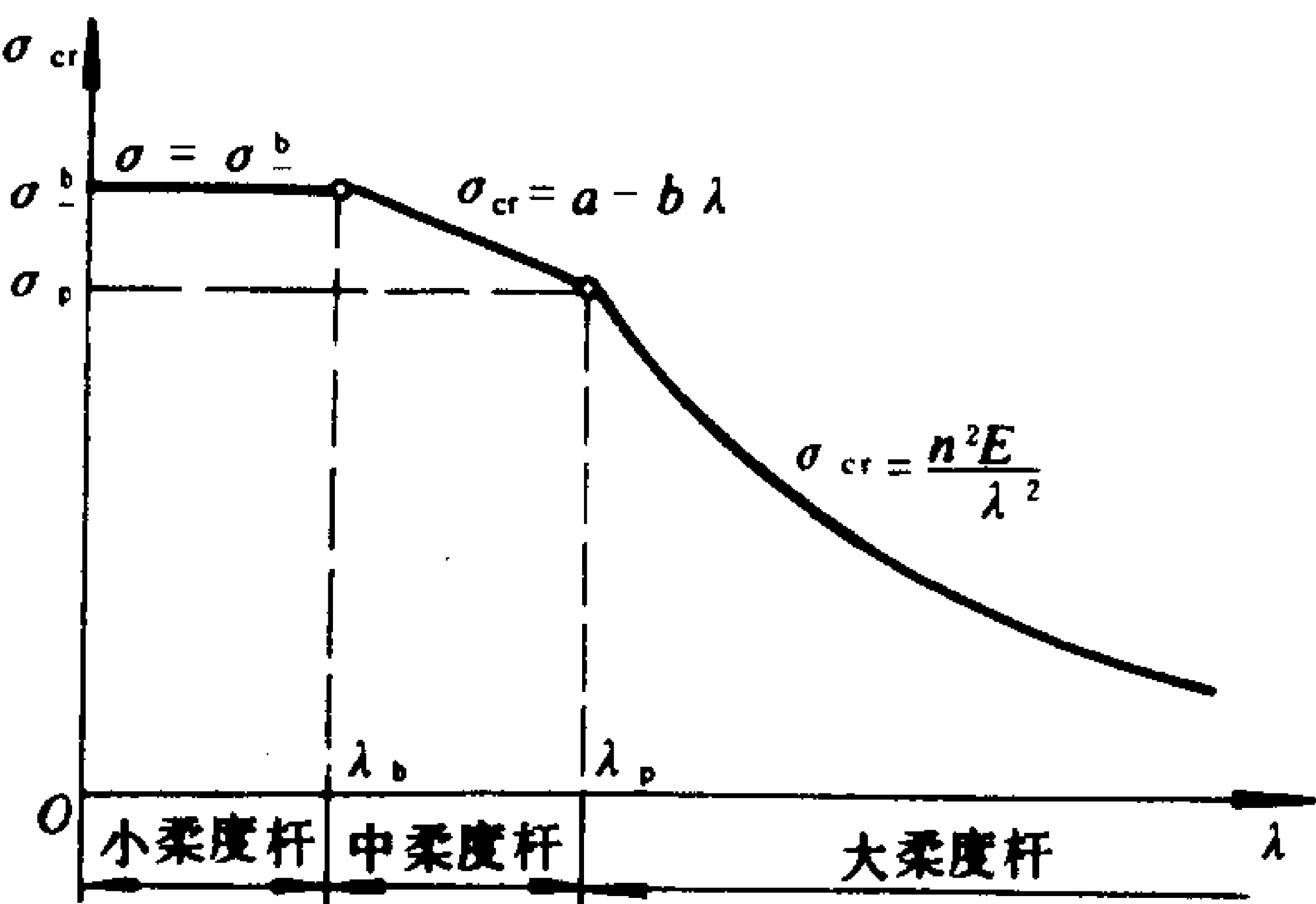


图 1.1.1-43 柔度分界

9.3 压杆稳定条件及其应用

9.3.1 中心压杆稳定条件

1)安全系数法

由 $$P \leq \frac{P_C}{n_w} \quad 得 \quad n=\frac{P_C}{P} \geq n_w \tag{1.1.1-80}$$

式中：P——工作载荷；

P_c——临界载荷；

n_w——稳定安全系数。

n_w 的值与压杆的工作情况有关，可查专业手册。轮机工程中常用的低速柴油机挺杆，取 $n_w=4\sim6$；高速发动机挺杆，取 $n_w=2\sim5$；一般金属结构中的压杆，取 $n_w=1.8\sim3$。

例：对图 1.1.1-44 所示活塞连杆，进行稳定校核，已知工作最大载荷 $P=115$ kN、材料为 A_3钢，$E=205$GPa，

$\sigma_s=235$MPa，$\sigma_p=202$MPa，稳定安全系数 $n_w=3$。

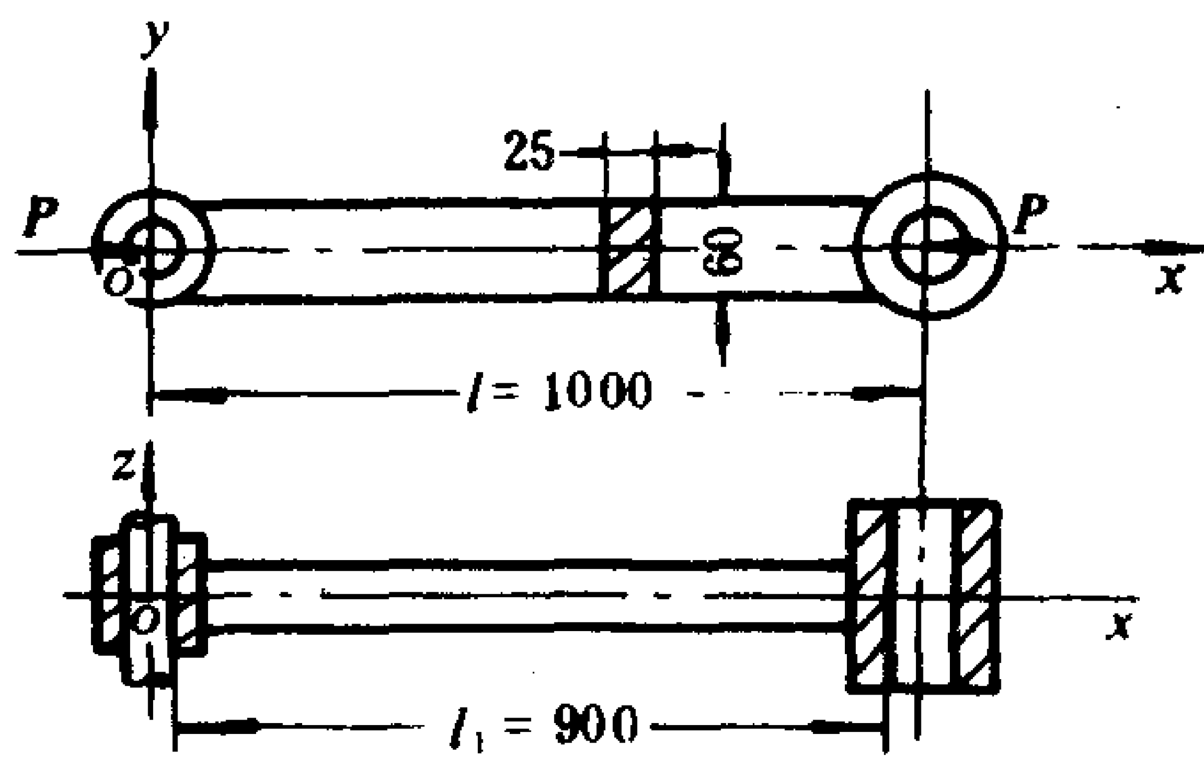


图 1.1.1-44

解：（1）计算柔度λ

若连杆在 xoy 平面内弯曲，连杆可简化为两端铰支，取 $\mu=1$。

$$i_z=\sqrt{\frac{I_z}{A}}=\sqrt{\frac{1/12\times2.5\times6^3}{2.5\times6}}=1.73\text{ cm}$$

$$\lambda_z=\frac{\mu l}{i_z}=\frac{1\times100}{17.3}=57.8$$

若连杆在 xoz 平面内弯曲，连杆可简化为两端固定，取$\mu=0.5$

$$i_y=\sqrt{\frac{I_y}{A}}=\sqrt{\frac{1/12\times6\times2.5^3}{2.5\times6}}=0.721\text{cm}$$

$$\lambda_y=\frac{\mu l}{i_y}=\frac{0.5\times92}{0.721}=63.8$$

$\lambda_y>\lambda_z$，可判断绕y轴是压杆的失稳方向，由表 1.1.1-44 查得：$\lambda_0=61.4$，$\lambda_p=100$，可判断$\lambda=63.8$ 属于中柔度杆范围。

（2）求临界应力并进行稳定校核

应用中柔度杆的经验公式：

$$\sigma_c=a-b\lambda$$

查表得 $a=304$；$b=1.12$，代入可得：

$$\sigma_c=232.5\text{MPa};\quad P_c=\sigma_c A$$

$$n=\frac{P_c}{P}=\frac{232.5\times10^6\times0.06\times0.025}{115\times1000}=3.03>n_w=3$$

2)折减系数法　在进行压杆设计时，常采用折减系数法，按许用应力 $[\sigma]$ 的形式来表示稳定条件。由：

$$\sigma=\frac{P}{A}\leq\frac{\sigma_c}{n_w}$$

取一个随 λ 变化的折减系数φ，并用材料的许用应力 $[\sigma]$ 来表达上式，可得：

$$\frac{\sigma_c}{n_w}=\varphi\ [\sigma];\quad \sigma=\frac{P}{A}\leq\varphi\ [\sigma] \tag{1.1.1-81}$$

几种常用材料的λ-φ关系曲线，如图 1.1.1-45 所示。

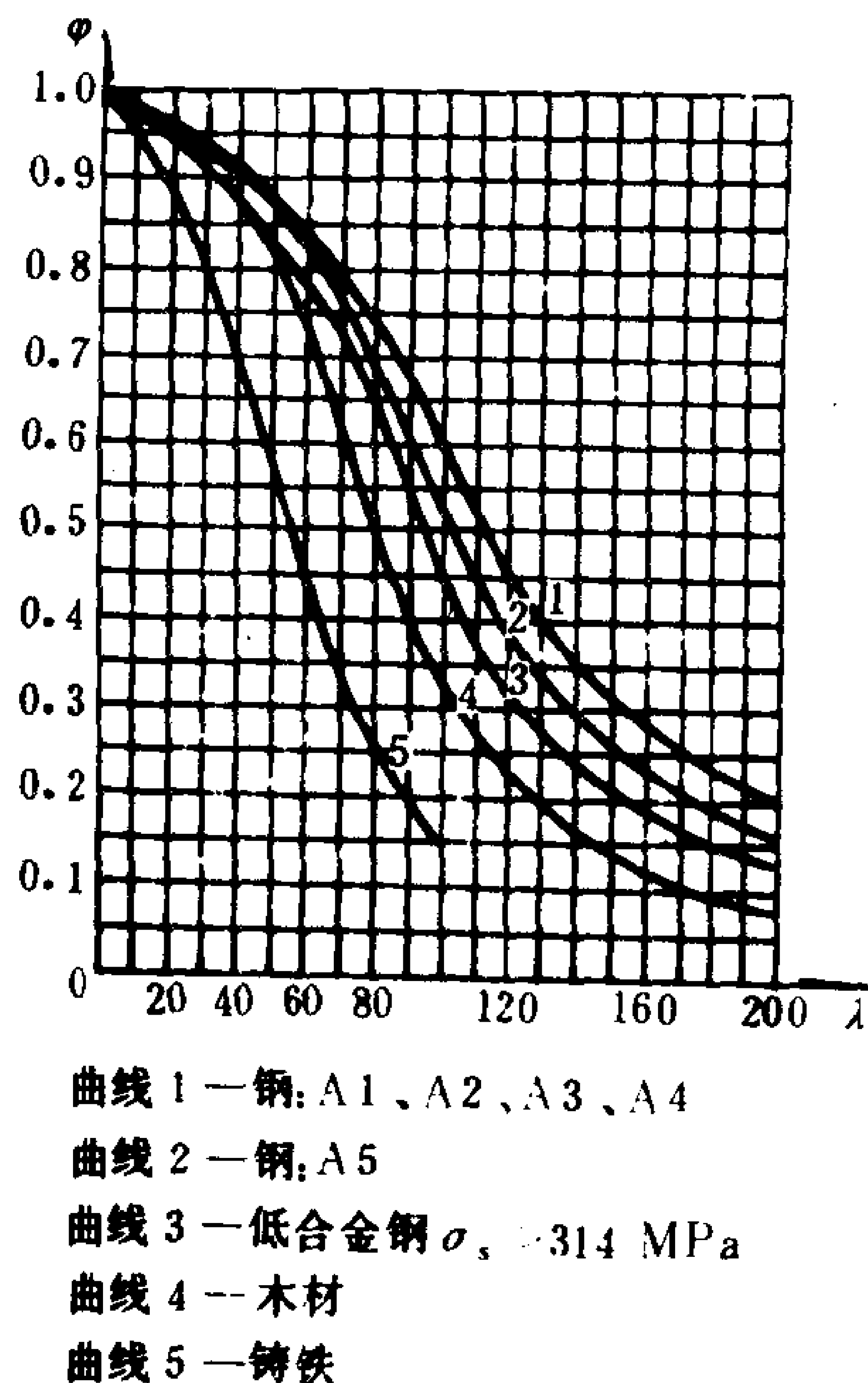


图 1.1.1-45　几种材料的λ-φ图

应用折减系数法进行压杆截面设计时，因φ值与λ值有关，而λ值又随截面A及有关的截面性质而变，需用逐次渐近法求解，参见下面的算例。

例：工字钢压杆，长 1.5 m，一端自由，一端固定，材料为 A_3钢，许用应力 $[\sigma]=157$ MPa，在自由端受到 196kN 的压力，试确定工字钢的型号。

解：先取 $\varphi_1=0.5$

可得：$A_1=\dfrac{P}{\varphi_1\ [\sigma]}=25\ \text{cm}^2$

选用 16 号工字钢，$A=26.1\text{cm}^2$，$i_{\min}=1.89$，柔度：

$$\lambda=\frac{\mu l}{i_{\min}}=159$$

查图可得：　$\varphi=0.28$

计算应力

$$\sigma_1=\frac{P}{\varphi A}=286\text{MPa}>157\text{MPa}$$

工作应力大于许用应力，折减系数取得太高，再取 $\varphi_2=0.3$

可得：$A_2=\dfrac{P}{\varphi_2\ [\sigma]}=41.5\text{cm}^2$

选用 22 a工字钢：$A=42\text{cm}^2$，$i_{\min}=2.31$ cm

杆的柔度：　$\lambda=\dfrac{\mu l}{i_{\min}}=130$

查图可得：　$\varphi=0.4$

计算应力：

$$\sigma_2=\frac{P}{\varphi A}=116\ \text{MPa}<157\ \text{MPa}$$

工作应力与许用应力相比偏低，尚可略为增加φ值。第三次取　$\varphi_3=0.35$

可得：　$A_3=\dfrac{P}{\varphi_3\ [\sigma]}=35.7\text{cm}^2$

选用 20 b工字钢：$A=39.5\text{cm}^2$，$i_{\min}=2.06$ cm

杆的柔度　$\lambda=\dfrac{\mu l}{i_{\min}}=146$

查图可得：　$\varphi=0.33$

计算应力：　$\sigma_3=\dfrac{P}{\varphi A}=151$ MPa

工作应力与许用应力接近，第三次计算结果满意。

工字钢的各项参数，可查阅有关手册。

9.3.2　偏心压杆

若受压杆的压力P不通过杆的轴线而有偏心值e时，将降低压杆的稳定性，其稳定条件如

下：

$$\sigma=\frac{P}{A}\leq\varphi_{p}\ [\sigma] \tag{1.1.1-82}$$

式中，φ_p为偏心压杆的折减系数；其值与λ，偏心值e及截面积A，抗弯模量w有关。A_3钢的φ_p值，列于表 1.1.1-45 中。

表 1.1.1-45　　　偏心压杆折减系数 φ_p 表（A_3钢$\sigma_s=235$MPa）

$\varepsilon=\frac{eA}{W}$	0.2	1	5	10	20	30	0.2	1	5	10	20	30
λ	φ_p											
0	0.865	0.563	0.199	0.105	0.053	0.035	0.930	0.720	0.277	0.147	0.075	0.050
10	0.848	0.548	0.196	0.104	0.053	0.035	0.920	0.695	0.271	0.145	0.074	0.050
20	0.831	0.529	0.193	0.103	0.052	0.035	0.900	0.662	0.263	0.141	0.072	0.049
30	0.812	0.509	0.189	0.101	0.052	0.034	0.875	0.630	0.254	0.138	0.071	0.048
40	0.788	0.487	0.183	0.100	0.052	0.034	0.830	0.597	0.243	0.135	0.070	0.047
50	0.760	0.465	0.177	0.098	0.051	0.033	0.788	0.558	0.234	0.130	0.069	0.046
60	0.730	0.442	0.171	0.096	0.050	0.033	0.736	0.523	0.224	0.126	0.068	0.045
70	0.693	0.419	0.165	0.094	0.049	0.033	0.676	0.482	0.213	0.122	0.066	0.044
80	0.651	0.396	0.159	0.092	0.049	0.033	0.630	0.446	0.203	0.118	0.665	0.043
90	0.602	0.373	0.153	0.090	0.048	0.032	0.571	0.411	0.192	0.114	0.063	0.042
100	0.549	0.350	0.147	0.088	0.048	0.032	0.530	0.379	0.183	0.110	0.062	0.042
110	0.494	0.328	0.142	0.086	0.047	0.031	0.470	0.352	0.173	0.106	0.060	0.041
120	0.443	0.306	0.136	0.083	0.046	0.031	0.431	0.320	0.165	0.102	0.059	0.041
130	0.397	0.284	0.131	0.081	0.045	0.030	0.388	0.293	0.156	0.098	0.057	0.040
140	0.354	0.262	0.126	0.079	0.045	0.030	0.348	0.271	0.149	0.095	0.055	0.040
150	0.306	0.242	0.121	0.076	0.044	0.030	0.306	0.247	0.141	0.091	0.054	0.039
160	0.272	0.225	0.116	0.074	0.043	0.029	0.272	0.227	0.134	0.087	0.053	0.038
170	0.243	0.207	0.112	0.071	0.043	0.029	0.243	0.209	0.127	0.084	0.052	0.038
180	0.218	0.192	0.108	0.069	0.042	0.028	0.218	0.191	0.120	0.080	0.051	0.037
190	0.197	0.177	0.104	0.067	0.041	0.028	0.197	0.176	0.114	0.078	0.049	0.036
200	0.180	0.164	0.099	0.065	0.040	0.028	0.180	0.165	0.107	0.075	0.048	0.035

注：16Mn 钢可按 $\lambda=\frac{\mu l}{i}\sqrt{\frac{\sigma_s}{235}}$查本表确定$\varphi_p$。

杆件除纵向受压外，还有横向力作用的情况，当然也存在稳定问题，但其分析方法更为复杂，可参阅有关资料中纵横弯曲部份的内容。

10　弹性理论基础

10.1　弹性力学平面问题的基本方程

应用材料力学方法进行构件的强度计算，公式形式简单，并有足够工程要求的精度，因而对于横截面尺寸远小于长度的杆件，一直被广泛地应用。但遇到非杆件形式的部件，例如板、厚壁筒及块体构件等，若再用材料力学的公式，就不能得出正确的结果，而必须应用更

精确的弹性力学方法。本节简单介绍弹性理论中的平面问题；通过图 1.1.1-46 中所示，对弹性体中某点的应力与应变进行分析，可得出弹性力学平面问题的基本方程如下：

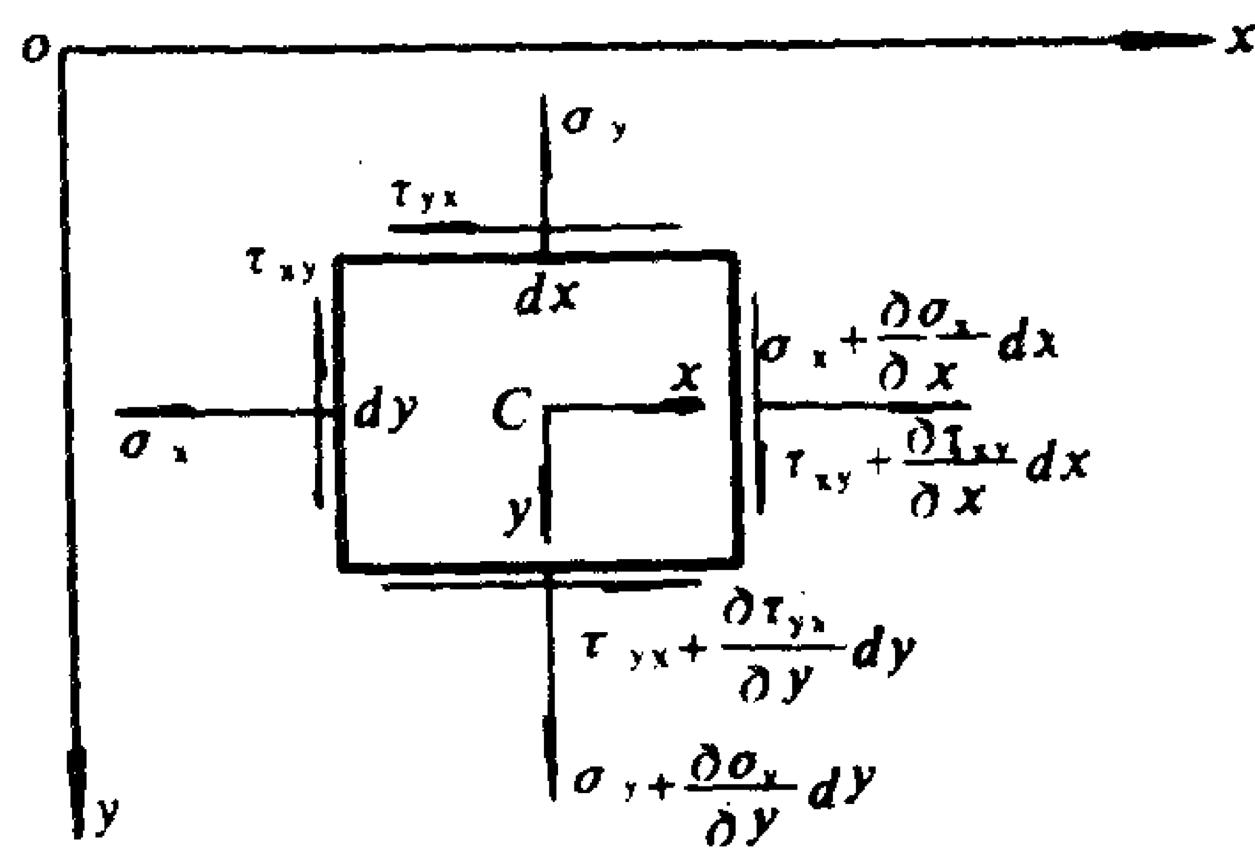


图 1.1.1-46

静力方程：

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+X=0$$
$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+Y=0 \qquad (1.1.1\text{-}83)$$

式中；X、Y分别表示作用在物体单位体积内的体积力，（例如重力、惯性力）在x、y方向上的分量。

几何方程：

$$\varepsilon_x=\frac{\partial u}{\partial x};\quad \varepsilon_y=\frac{\partial v}{\partial y};\quad \gamma_{xy}=\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y} \qquad (1.1.1\text{-}84)$$

式中，u、v分别是点在x、y方向的位移。

由几何方程可得出变形连续方程：

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}=\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \qquad (1.1.1\text{-}85)$$

物理方程（分二种情况）：

1)平面应力情况　$\sigma_z=0$；$\tau_{zx}=\tau_{yz}=0$。

$$\varepsilon_x=\frac{1}{E}(\sigma_x-\mu\sigma_y)$$
$$\varepsilon_y=\frac{1}{E}(\sigma_y-\mu\sigma_x) \qquad (1.1.1\text{-}86)$$
$$\gamma_{xy}=\frac{1}{G}\tau_{xy}=\frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy}$$

2)平面应变情况　$\varepsilon_z=0$；$\tau_{zx}=\tau_{yz}=0$。

$$\varepsilon_x=\frac{1-\mu^2}{E}\left(\sigma_x-\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_y\right)$$
$$\varepsilon_y=\frac{1-\mu^2}{E}\left(\sigma_y-\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_x\right) \qquad (1.1.1\text{-}87)$$
$$\gamma_{xy}=\frac{1}{G}\tau_{xy}=\frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy}$$

对于具体问题，求出基本方程的解，并要满足边界条件：

$$l\sigma_x+m\tau_{xy}=X$$
$$m\sigma_y+l\tau_{xy}=Y \qquad (1.1.1\text{-}88)$$

式中：l，m——边界面上的法线N与x，y轴的夹角的方向余弦，$l=\cos(N, x)$；$m=\cos(\hat{N}, y)$；

X、Y——是边界面上的外应力。

上述方程的求解，是相当复杂的，一般有求精确解的应力函数法、求数值近似解的差分法及有限单元法等，可参阅弹性理论方面的专著。

10.2 厚壁圆筒的计算

10.2.1 平面坐标方程及轴对称问题

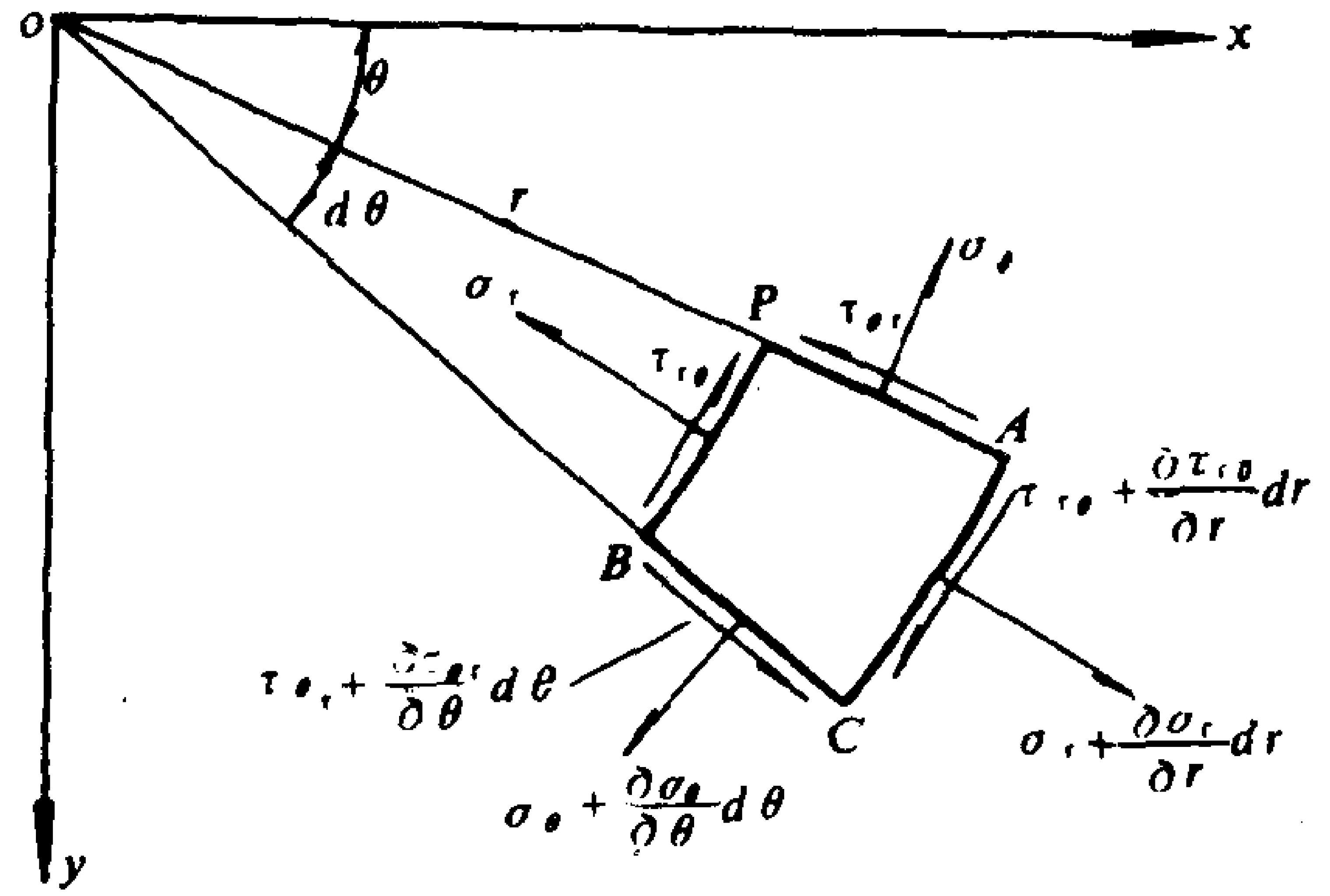


图 1.1.1-47

如图 1.1.1-47 所示，一点的应力与应变在平面中以极坐标表示，若不考虑体积力，其静力平衡方程为

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial\theta}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0$$

$$\frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta}+\frac{2\tau_{r\theta}}{r}=0 \qquad (1.1.1\text{-}89)$$

对于研究对象的几何形状及外部边界条件均满足轴对称条件的情况，σ_r及 σ_θ 仅为r的函数而与θ无关，且 $\tau_{r\theta}=0$，则上述方程变为：

$$\frac{d\sigma_r}{dr}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0 \qquad (1.1.1\text{-}90)$$

求解过程就比较简单了。

10.2.2 厚壁筒计算

轮机工程中，如锅炉、汽缸、高压管道等圆筒形构件，当外径d_2与内径d_1之比$K=\frac{d_2}{d_1}>1.2$时，均作为厚壁筒来计算，其特点为：几何尺寸为轴对称，轴向尺寸较长，壁厚沿轴向不变，承受的压力也是轴对称的，且均匀分布。

1)厚壁筒的计算公式　按轴对称条件，可解得不同边界条件下，厚壁筒的应力与位移的计算公式，列于表 1.1.1-46 中。

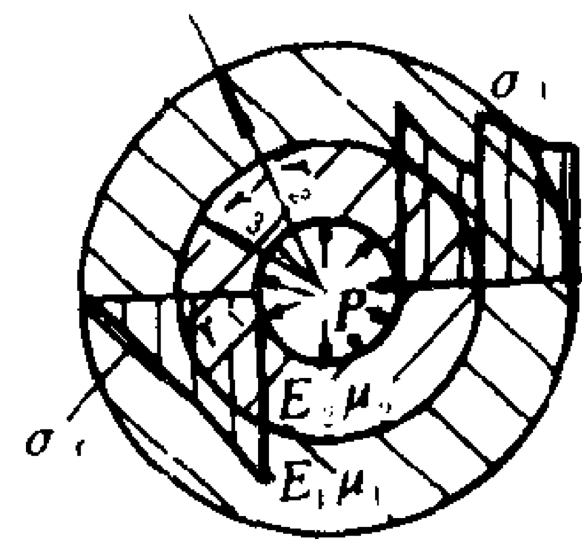
表 1.1.1-46　　　　**厚壁圆筒的应力与位移公式**

载荷情况	应力计算公式	位移计算公式
(1)受均匀内压 p_1，外压 p_2作用	(1) $\sigma_t=\frac{p_1r_1^2-p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}+\frac{r_1^2r_2^2(p_1-p_2)}{r^2(r_2^2-r_1^2)}$ (2) $\sigma_r=\frac{p_1r_1^2-p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}-\frac{r_1^2r_2^2(p_1-p_2)}{r^2(r_2^2-r_1^2)}$ (3) σ_z分三种情况: (a) 两端闭口 $\sigma_z=\frac{p_1r_1^2-p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}$ (b) 两端开口 $\sigma_z=0$ (c) 平面应变状态 $\sigma_z=\frac{2\mu(p_1r_1^2-p_2r_2^2)}{r_2^2-r_1^2}$	(1) 两端闭口 $u_r=\frac{1}{E}\left[\frac{(1+\mu)(p_1-p_2)r_1^2r_2^2}{r(r_2^2-r_1^2)}+\frac{(1-2\mu)(p_1r_1^2-p_2r_2^2)r}{r_2^2-r_1^2}\right]$ (2) 两端开口 $u_r=\frac{1}{E}\left[\frac{(1+\mu)(p_1-p_2)r_1^2r_2^2}{r(r_2^2-r_1^2)}+\frac{(1-\mu)(p_1r_1^2-p_2r_2^2)r}{r_2^2-r_1^2}\right]$ (3) 平面应变状态 $u_r=\frac{1}{E}\left[\frac{(1+\mu)(p_1-p_2)r_1^2r_2^2}{r(r_2^2-r_1^2)}+\frac{(1+\mu)(1-2\mu)(p_1r_1^2-p_2r_2^2)r}{r_2^2-r_1^2}\right]$

续上表

载 荷 情 况	应力计算公式	位移计算公式
	(4) 最大切应力 $\tau_{max}=\frac{\sigma_t-\sigma_z}{2}$ $=\frac{(p_1-p_2)r_1^2r_2^2}{r^2(r_2^2-r_1^2)}$	
(2) 仅受均匀内压 p_1作用	(1)$\sigma_t=\frac{p_1r_1^2}{r_2^2-r_1^2}\left(1+\frac{r_2^2}{r^2}\right)$ (2)$\sigma_r=\frac{p_1r_1^2}{r_2^2-r_2^2}\left(1-\frac{r_2^2}{r^2}\right)$ $r=r_1$时（内壁） $\sigma_{tmax}=p_1\frac{K^2+1}{K^2-1}$ $\sigma_{rmax}=-p_1$ (3)σ_z分三种情况 (a) 两端闭口 $\sigma_z=\frac{p_1r_1^2}{r_2^2-r_1^2}=\frac{p_1}{K^2-1}$ (b) 两端开口 $\sigma_z=0$ (c) 平面应变状态 $\sigma_z=\frac{2\mu p_1r_1^2}{r_2^2-r_1^2}=\frac{2\mu p_1}{K^2-1}$ (4)$\tau_{max}=\frac{\sigma_t-\sigma_r}{2}=\frac{p_1r_1^2r_2^2}{r^2(r_2^2-r_1^2)}$	(1)两端闭口 $u_r=\frac{p_1r_1^2}{E(r_2^2-r_1^2)}\times\left[\frac{(1+\mu)r_2^2}{r}+(1-2\mu)r\right]$ (2) 两端开口 $u_r=\frac{p_1r_1^2}{E(r_2^2-r_1^2)}\times\left[\frac{(1+\mu)r_2^2}{r}+(1-\mu)r\right]$ (3)平面应变状态 $u_r=\frac{P_1r_1^2(1+\mu)}{E(r_2^2-r_1^2)}\times\left[\frac{r_2^2}{r}+(1-2\mu)r\right]$
(3) 仅受均匀外压 p_2作用	(1)$\sigma_t=-\frac{p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}\left(1+\frac{r_1^2}{r^2}\right)$ (2)$\sigma_r=-\frac{p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}\left(1-\frac{r_1^2}{r^2}\right)$ $r=r_1$时（内壁） $\sigma_{tmax}=-\frac{2p_2K^2}{K^2-1}$ $r=r_2$时（外壁） $\sigma_{rmax}=-p_2$ (3)σ_z分三种情况 (a) 两端闭口 $\sigma_z=-\frac{p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}=-\frac{p_2K^2}{K^2-1}$ (b) 两端开口 $\sigma_z=0$ (c) 平面应变状态 $\sigma_z=-\frac{2\mu p_2r_2^2}{r_2^2-r_1^2}=\frac{2\mu p_2K^2}{K^2-1}$ (4)$\tau_{max}=\frac{\sigma_t-\sigma_r}{2}$ $=-\frac{p_2r_1^2r_2^2}{r^2(r_2^2-r_1^2)}$	(1) 两端闭口 $u_r=-\frac{p_2r_2^2}{E(r_2^2-r_1^2)}\times\left[\frac{(1+\mu)r_1^2}{r}+(1-2\mu)r\right]$ (2)两端开口 $u_r=-\frac{p_2r_2^2}{E(r_2^2-r_1^2)}\times\left[\frac{(1+\mu)r_1^2}{r}+(1-\mu)r\right]$ (3)平面应变状态 $u_r=-\frac{p_2r_2^2(1+\mu)}{E(r_2^2-r_1^2)}\times\left[\frac{r_1^2}{r}+(1-2\mu)r\right]$

2)组合圆筒及过盈配合计算　组合圆筒是由内外两个圆筒如图1.1.1-48所示，通过过盈配合而组成的。应用厚壁筒的计算公式，求出内外筒之间的接触压力 P_j，即可分别对内外筒进行计算。关于接触应力及过盈配合的有关计算公式如下：



(1)接触压力 P_j 及过盈量δ的计算式

①接触压力 P_j 的计算公式

$$P_j=\frac{\delta}{2r_2}\frac{1}{\frac{r_3^2+r_2^2}{E(r_3^2-r_2^2)}+\frac{r_2^2+r_1^2}{E_2(r_2^2-r_1^2)}+\frac{\mu_1}{E_1}-\frac{\mu_2}{E_2}} \quad (1.1.1\text{-}91)$$

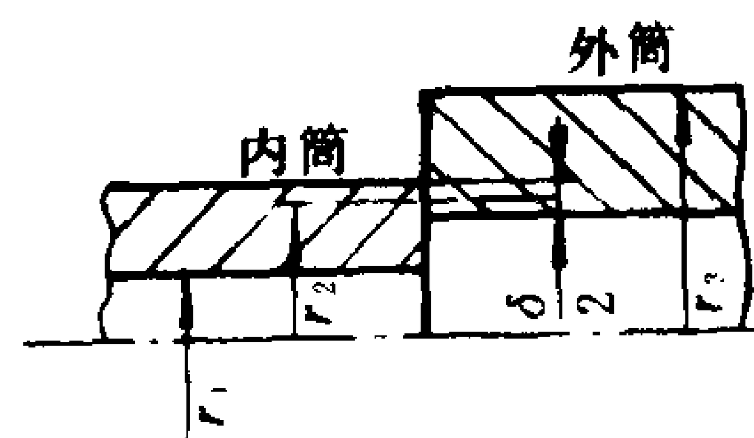


图1.1.1-48

式中：r_1——内筒内半径；

r_2——内筒、外筒接触面半径；

r_3——外筒外半径；

E_1、E_2——内、外筒材料弹性模量；

μ_1、μ_2——内、外筒材料的泊松比。

②过盈量公式（内外筒材料相同）

$$\delta=\frac{4P_jr_2^3}{E}\frac{r_3^2-r_1^2}{(r_3^2-r_2^2)(r_2^2-r_1^2)} \quad (1.1.1\text{-}92)$$

如内筒代之以实心轴，则可取 $r_1=0$代入即可。

(2)过盈配合计算　发动机常采用加热过盈配合工艺，在曲轴外加套或汽缸内加套，有关计算过程如下：

①过盈量经验公式

$$\delta=\frac{d}{25}\times0.04 \quad (1.1.1\text{-}93)$$

式中：δ——轴孔或双筒之间的过盈量，mm；

d——配合处的公称直径，mm。

②压入力计算式

$$P=2P_j\pi r_2lf \quad (1.1.1\text{-}94)$$

式中：l——压入面长度；

f——摩擦系数。

③加热温度计算式（均匀温度场）

$$t=\frac{\delta}{\alpha r_2}℃ \quad (1.1.1\text{-}95)$$

式中：t——需要加热的温度,℃；

α——材料热膨胀系数，1/℃；

r_2——内外筒接触半径；

δ——内外筒半径的过盈量。

10.3 线弹性断裂力学简介

10.3.1 裂纹的类型及应力强度因子

应用高强度材料制成的构件在工作过程中，虽然工作应力满足强度条件，且属塑性材料，

却出现了低应力脆断现象。这种现象的产生，是由于加工或材料不均匀等原因，致使构件中存在微观甚至宏观的裂纹，如图 1.1.1-49 所示，这些裂纹在一定的应力作用下，迅速扩展，最终导致构件的破坏。对这种破坏现象的研究，逐步形成了线弹性断裂力学及弹塑性断裂力学两部分，本节对线性弹性断裂力学的一些基本概念，作简要介绍。

1)裂纹的类型　构件中的裂纹，按其受力及裂纹表面位移的形式，可分为a)、b)、c)三类如图 1.1.1-50 所示，其中 I 型裂纹最为常见，也最危险，现仅针对它作一些介绍。

2)应力强度因子　应用弹性理论，对裂纹尖端处的应力场进行分析之后，发现在裂纹尖端反应其应力场的强弱程度，可用一个参量$\sigma\sqrt{\pi a}$来表达，其中σ为距裂纹较远处的工作应力，a为裂纹长度。对各种不同情况的裂纹进行分析之后，得出一个普遍可用的表达式(对 I 型裂纹)。

$$K_{\rm I}=\alpha\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1.1.1-96}$$

式中：α——构件上不同几何特性及不同受载条件的修正系数;

$K_{\rm I}$——I 型裂纹应力强度因子。

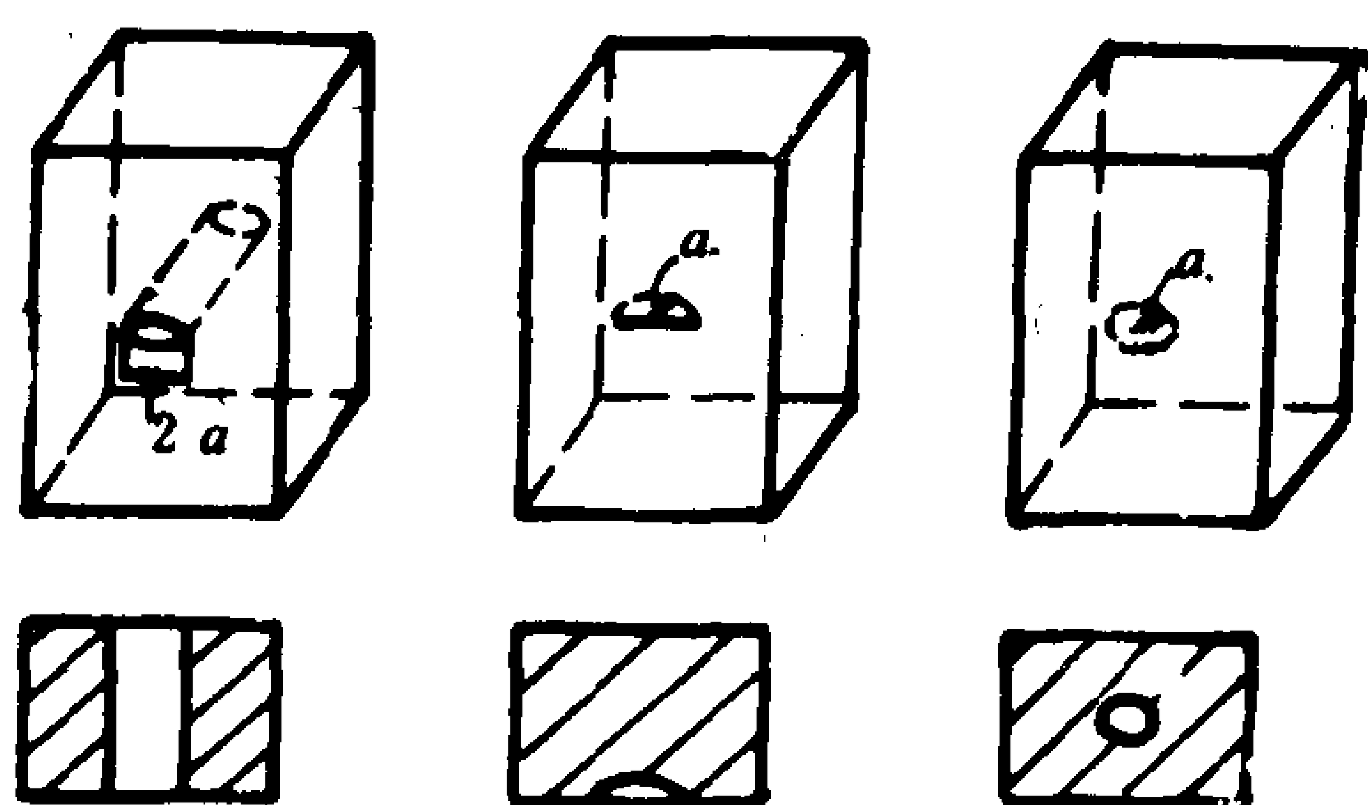
应力强度因子 $K_{\rm I}$ 及修正系数α，有专用手册可查。表 1.1.1-47 中列出了几种常见修正系数α的计算公式

表 1.1.1-47　**几种常见 I 型裂纹的修正系数**

类　型	修正系数α的计算公式
	$\alpha=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\left[1.99-0.41\left(\frac{a}{h}\right)+18.70\left(\frac{a}{h}\right)^2-38.48\left(\frac{a}{h}\right)^3+53.85\left(\frac{a}{h}\right)^4\right]$; $\alpha=1.12$，(当$a\ll h$时)。
	$\alpha=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\left[1.77+0.227\left(\frac{a}{h}\right)-0.510\left(\frac{a}{h}\right)^2+2.7\left(\frac{a}{h}\right)^3\right]$; $\alpha=1.0$，(当$a\ll h$时)。
	$\alpha=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\left[1.98+0.36\left(\frac{2a}{h}\right)-2.12\left(\frac{2a}{h}\right)^2+3.42\left(\frac{2a}{h}\right)^3\right]$; $\alpha=1.12$，(当$a\ll h$时)。
$\sigma=\frac{6M}{Bh_2}$，B—板厚	$\alpha=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\left[1.99-2.47\left(\frac{a}{h}\right)+12.97\left(\frac{a}{h}\right)^2-23.17\left(\frac{a}{h}\right)^3+24.80\left(\frac{a}{h}\right)^4\right]$ $\alpha=1.12$，(当$a\ll h$时)。

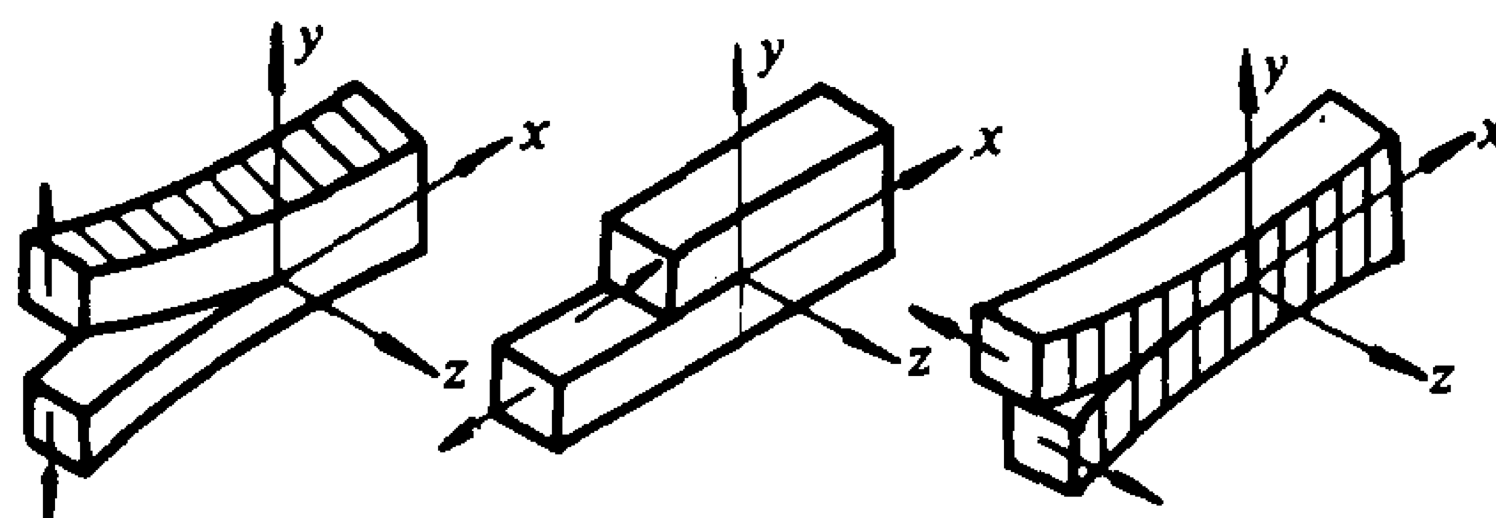
10.3.2　断裂韧度及断裂判据

通过试验，可测得不同材料使裂纹产生失稳扩展的临界应力强度因子值，称为材料的断裂韧度。对平面穿透裂纹而言，平面应变断裂韧度是各种类型中数值最小的一种，用 $K_{\rm IC}$ 表



a）穿透裂纹　b）表面裂纹　c）深埋裂纹

图 1.1.1-49　常见的三种裂纹



a）张开型　b）滑开型　c）撕开型

图 1.1.1-50　裂纹扩展的形式

示。K_{IC} 代表材料抵抗脆性断裂的最低能力，因此，以它作为材料发生脆断的一种指标。常用材料的 K_{IC} 值，列于下面。

45#钢　　$K_{IC}=101\ \text{MPa}\cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$;

30 CrMnSiNiA　　$K_{IC}=80.3\ \text{MPa}\cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$;

18 MnMoNiCr　　$K_{IC}=276\ \text{MPa}\cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$;

7075—T_6 铝合金　　$K_{IC}=32\ \text{MPa}\cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$。

当 I 型裂纹尖端的实际工作应力强度因子 K_I 值达到材料的断裂韧度 K_{IC} 时，裂纹就要失稳扩展发生脆断，其临界条件为：

$$K_I=K_{IC} \tag{1.1.1-97}$$

称为脆性断裂判据。工作杆件在发现有宏观裂纹a之后，要保持其继续工作的能力，必须满足：

$$K_I<K_{IC} \tag{1.1.1-98}$$

10.4　热应力简介

受力的弹性固体若在高温下工作，由于温度导致固体变形，会产生很大的热应力，并且材料的弹性极限因温度升高而下降，使杆件的强度降低，为此，就温度对弹性固体的形变与应力的影响，进行研究，形成了热弹性理论这一分支。热弹性理论的研究中，在弹性力学的基本方程中，考虑了温度引起的线膨胀影响，反映在物理方程中为：

$$\varepsilon_x=\frac{1}{E}(\sigma_x-\mu\sigma_y)+\alpha t' \tag{1.1.1-99}$$

式中：α——材料的线膨胀系数；

　　t'——温度的变化值。

此外，还考虑温度场的影响，组成了更为复杂的热弹性力学基本方程，从力学及热力学两方面来解具体问题。最简单的热应力问题，是等温度场的条件下的一维热应力问题，其计算公式形式较简单，如对二端固定的杆件，由温度t_1升至t_2而引起的热应力计算公式为：

$$\sigma_T=E\alpha\ (t_2-t_1) \tag{1.1.1-100}$$

对于四周固定的薄板，则计算公式为：

$$\sigma_T=\frac{E\alpha(t_2-t_1)}{1-\mu} \tag{1.1.1-101}$$

船舶内燃机工作时，有一些受力零件，经常在高温条件下工作，对它们进行强度计算时，必须考虑热应力的影响，更复杂的情况，可参阅有关热弹性理论方面的专著。

参考文献

〔1〕机械工程手册、电机工程手册编辑委员会：机械工程手册，第4篇 工程力学，机械工业出版社，1978

〔2〕机械工程手册、电机工程手册编辑委员会：电机工程手册，第一篇 常用数据和资料，机械工业出版社，1980

〔3〕西安交通大学理论力学教研室：理论力学，人民教育出版社，1979

〔4〕单辉祖主编：材料力学教程，国防工业出版社，1982

〔5〕徐芝纶编：弹性力学，人民教育出版社，1979

〔6〕冈野修一著、赵平译，机械公式应用手册，台北台隆书店出版，1982

〔7〕Г. С. 皮萨连科 А. П. 亚科符列夫 В. В. 马特维也夫著，范钦珊 朱祖成译：材料力学手册，中国建筑工业出版社，1985

第 2 章　机械设计基础

1　机械设计基础概述

“机械设计基础”是由“机械原理”和“机械零件”两部分组成，它是研究机械中的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点和设计计算方法。它所研究的具体内容有以下几方面：

1)研究各种机械传动和常用机构的结构、工作特点、运动和动力特性及其设计计算方法；

2)从强度、刚度、寿命、结构工艺性等方面研究通用零件和机械部件的设计计算方法；

3)研究机械设计的基本原理和方法。

1.1　机器、机构、构件、零件

机器是用来转换或利用机械能的机构，通常由动力机、传动机构和执行机构三个主要部分组成。机械是机器、机构的泛称。

机器具有如下共同特征：1)它们都是一种人为的实物组合；2)组成机器的各个构件间都具有一定的相对运动；3)各种机器均能完成有用的机械功（如起重机吊起重物）或转换机械能（如电动机、内燃机分别将电能和热能转换成机械能）。

最简单的机器只包含一个机构，如电动机、鼓风机等只包含一个双杆机构。多数机器都包含若干机构，如内燃机就包含了曲柄滑块机构、凸轮机构和齿轮机构等三种机构。

机构是由若干个相互能作一定的相对运动的刚体或抗力体(如气体或液体——相对压力，带或索——相对拉力）等的组合体。

机构与机器的区别，一般认为机构只具备机器的前两个特征，而不考虑它们在作功和变换能量方面所起的作用。

由一个零件或由两个以上零件刚性固结而成的运动单元体称为构件。因此，构件与零件的区别在于：构件是运动的单元，而零件是制造单元。

机械中的零件可分为两大类。一类称为通用零件，它在各种机械中都能经常遇到，如齿轮、螺栓、轴、轴承、弹簧等。另一类称为专用零件，它只出现于某些机械之中，如汽轮机的叶片，内燃机的活塞和船舶中的螺旋桨等。另外，人们还常把由一组协同工作的零件所组成的独立制造或独立装配的组合体称为部件，如减速器、离合器等。

要想设计出一台很好的机器，必须很好地设计或选择它的零件，而每个零件的设计或选择，又是和整台机器的要求分不开的。因此，设计或选择机械零件时，必须掌握它的基本要求。

1.2　设计机械零件时的基本要求

1)足够的强度

当零件受载荷后，不许有断裂或残余变形。为了使机械零件具有足够的强度，在设计时可以采取以下措施：使零件具有足够的剖面尺寸；合理地设计零件的剖面尺寸，以增大剖面的惯性矩；采用强度高的材料；采用热处理方法，以提高材料的机械性能；合理地提高零件

的制造精度，以降低零件工作时的动载荷；合理地配置机器中各零件的相互位置，以降低作用在零件上的载荷。

2）足够的刚度

零件受载荷后所产生的弹性变形应不超过允许限度。一般对零件刚度要求较严的机器（如机床），除强度计算外，还必须进行刚度计算。为了提高零件的刚度，可采取增大零件的剖面尺寸或增大零件的剖面惯性矩；缩短支承跨距或采用多支点结构，以减小挠曲变形。

3）一定的寿命

要求零件在设计要求的寿命期限内不产生失效现象，即设计的零件要具有足够的疲劳强度。为了提高零件的疲劳强度，在设计时可采取以下措施：尽可能降低零件上的应力集中的影响；选用疲劳强度高的材料和采用能够提高材料疲劳强度的热处理方法及强化工艺；提高零件的表面质量，即在应力较高区域的零件表面应降低粗糙度；尽可能地减小或消除零件表面可能发生的初始裂纹。

4）合理的工艺性

设计机械零件时有关工艺性的基本要求如下：

（1）造型简单化　在可能范围内，应采用最简单的表面，并力求减少被加工表面的数量和面积；

（2）加工的可能性和方便性　设计出来的零件一定要考虑该零件是否能够加工，在保证能够加工的前提下，还要考虑加工是否方便。此外，加工精度和表面粗糙度应根据实际要求确定，不要随意提高加工精度和减小表面粗糙度，在能够满足工作要求的前提下，具有最低加工精度和最大表面粗糙度等级的零件，工艺性最好；

（3）装拆的可能性和方便性　设计出来的零件和部件一定要保证能够装拆，在保证能够装拆的前提下，还应力求装拆方便。

5）要满足安全技术要求

设计的零、部件应考虑操作机器的人员的人身安全和机器工作时的人身安全。因此，各种各样的防护装置及措施（例如防护罩、安全联轴器、操作连锁闭合装置等），就成为机器不可少的组成部分。

6）经济性要求

影响经济性的主要因素是所选用材料的加工性能和利用率以及零件的结构。在很多情况下，零件在其不同部位上对材料有不同的要求。要选用一种材料来满足不同的要求，事实上是不可能的。但可根据局部品质原理，在不同的部位上采用不同的材料（例如蜗轮的轮齿必须具有良好的耐磨性和较高的抗胶合能力，其他部分只需具有一般的强度即可，故可在铸铁轮芯上套上青铜齿圈，以满足这些要求），或采用不同热处理方法（例如对齿轮齿面有较高的硬度要求时，可采用表面淬火、表面渗碳等方法来实现这些要求）。这样可以节省贵重金属，并充分发挥材料的机械性能，符合经济要求。

1.3　设计零件的步骤

设计机械零件的一般步骤如下：

1）根据机器所传递的功率、转速和具体工作情况，确定作用在零件上的载荷；

2）根据材料的机械性能、物理性质、经济因素及供应情况等选择零件的材料；

3）按强度、刚度或疲劳强度等条件，计算出零件所需的主要尺寸。若有标准尺寸，则必

须取标准值(如螺栓直径、齿轮和蜗轮的模数和三角带的内周长度等)。若无标准尺寸：对结构尺寸，最好圆整到个位数为 0 或 5 的整数；对几何尺寸，则至少要准确到小数点以下二位（如齿轮的分度圆直径、齿顶圆直径和齿根圆直径等)。

4)根据结构和工艺的要求绘制零件工作图，并确定其他次要尺寸（按结构或经验公式来确定)。

1.4 机械零件的强度

1.4.1 应力的种类

当机器工作时，零件中所受的应力，按随时间变化的特性不同，可分为静应力和变应力两大类。

不随时间变化的应力，称为静应力(如图 1.1.2-1 a)。纯粹的静应力在机器中是没有的，但如应力变化缓慢，就可近似地看作静应力，例如，锅炉的内压力所引起的应力和拧紧螺栓时所引起的应力等。

随时间变化的应力，称为变应力（如图 1.1.2-1 b)。因为机器在正常工作下其运动是有规律的，所以机器中的零件是属于周期性的循环变应力。从图 1.1.2-1 b)知，当变应力的最大应力为σ_{max}、最小应力为σ_{min}时，则

平均应力

$$\sigma_m=\frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2} \tag{1.1.2-1}$$

应力幅

$$\sigma_a=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2} \tag{1.1.2-2}$$

循环特性

$$\gamma=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{1.1.2-3}$$

循环特性乃表示应力变化的情况。

当$\sigma_{min}=0$ 时，则$\sigma_m=\sigma_a=\frac{\sigma_{max}}{2}$，而$\gamma=0$，称为脉动循环变应力（如图 1.1.2-1 c)。

当$\sigma_{max}=-\sigma_{min}$时，则$\sigma_m=0$，$\sigma_a=\sigma_{max}$，而$\gamma=-1$，称为对称循环变应力(如图 1.1.2-1 d)。

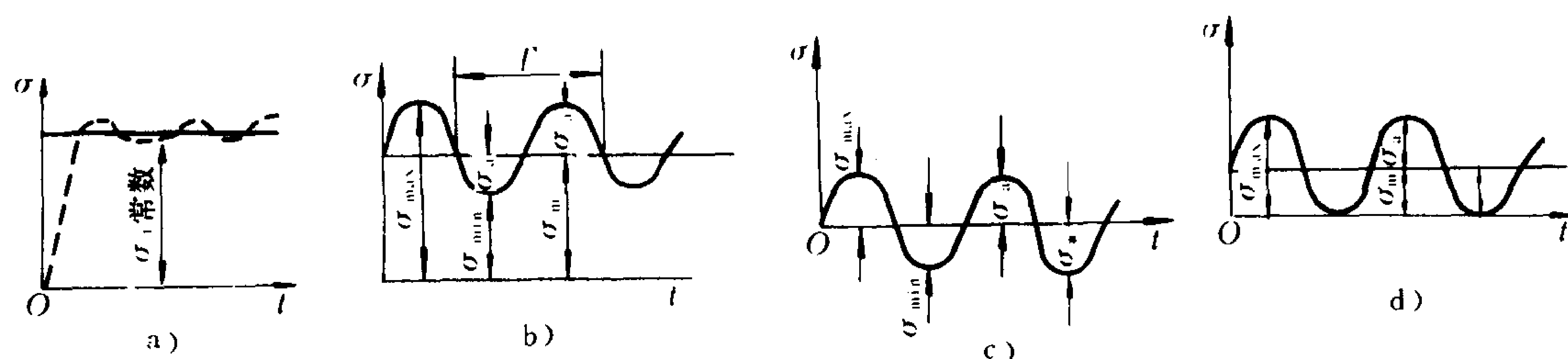


图 1.1.2-1 应力的种类

零件的破坏形式和材料的极限应力与零件中的应力类型有关。在进行零件强度计算时，首先要弄清零件的应力类型。

1.4.2 许用应力与安全系数

设计零件时，计算出来的应力允许达到的最大值，称为许用应力。用带方括号的应力符号来表示，如〔σ〕、〔τ〕等。设计零件时必须保证计算应力

$$\sigma_{ca} \leq [\sigma] \qquad \tau_{ca} \leq [\tau] \tag{1.1.2-4}$$

许用应力〔σ〕、〔τ〕等于极限应力σ_{lim}、τ_{lim}与安全系数S之比，即

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{S} \qquad [\tau] = \frac{\tau_{lim}}{S} \tag{1.1.2-5}$$

随着材料性质和应力种类的不同，σ_{lim}和τ_{lim}也不相同。在静应力下工作时，塑性材料制成的零件，应按照不发生塑性变形的条件进行强度计算，通常取材料的屈服限σ_s或τ_s作为极限应力。脆性材料制成的零件，通常取材料的强度极限σ_B或τ_B作为极限应力。在变应力下工作的零件，应按照不发生疲劳损坏的条件进行强度计算，通常取材料的疲劳极限σ_{-1}、τ_{-1}(对称循环时）或σ_0、τ_0（脉动循环时）作为极限应力。以上σ_s、τ_s、σ_B、τ_B、σ_{-1}、τ_{-1}、σ_0、τ_0等数值，可从有关手册中查得。

安全系数选得正确与否对零件尺寸具有很大影响。如果安全系数选得过大，将使结构笨重；选得过小时，又可能不够安全。

在各个不同的机械制造部门，通过长期生产实践，都制订有适合本部门的安全系数（或许用应力）的表格。这类表格虽然适用范围较窄，但具有简单、具体及可靠等优点。本章主要采用查表法选取安全系数（或许用应力）。

当没有专门的表格可查时，可参考下述原则选择安全系数：

$S=1.25\sim1.5$　适用于特别可靠的材料，在完全受控的工作条件下应用，以及载荷和应力的确定是非常准确的场合；

$S=1.5\sim2$　适用于对材料性质了解很充分，使用条件不会改变，载荷及应力能较可靠地求出的场合；

$S=2\sim2.5$　适用于中等质量的材料，一般使用条件，载荷和应力一般地便于求出的场合；

$S=2.5\sim3$　对未经充分检验的材料及脆性材料，中等使用条件的场合；

$S=3\sim4$　对未经检验的材料，中等使用条件的场合，或材料虽经检验，但使用环境和承受的应力都是很不确定的场合；

1.4.3 可靠性概述

上述的强度计算法，主要是建立在下列条件式下：

$$\text{计算安全系数}S_{ca} = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma} = \frac{\sigma_{lim}}{\frac{F}{A}} \geq S \text{（设计安全系数）}$$

它的基本出发点，认为条件式中的各个量都是确定量，而且强度准则是满足上述条件式的。用这样的设计概念，有两方面问题不能满意地解决。

1）设计安全系数S是根据经验而定的数值，它在一个较大的范围内取值，因而对于同一产品分别由两人设计，其结果不同。对这样的分歧，强度条件式本身就不能解决。

2）在实际工作中，即使按选取的最大安全系数设计出的零件，也有工作不到预期寿命时发生破坏的事例。

产生这些问题的原因，就是由于强度条件式中的各个量都不是固定不变的量，而是服从于一定的分布规律的随机变量。从一般概念来看，零件材料的极限应力σ_{lim}是服从于概率密度函数为$f(\sigma)$的随机变量，而作用于零件剖面上的工作应力s是服从于概率密度函数为$g(s)$的

随机变量。由于极限应力和工作应力有相同的量纲，所以，可以把这两个密度函数的图象表示在同一坐标上。对于按强度条件式设计出的属于安全的零件，有两种强度一应力关系，如图 1.1.2-2 所示。

在图 1.1.2-2 a)中，两概率密度曲线不重叠，即最大可能的工作应力都小于最小可能的极限应力。因此，工作应力大于零件强度是不可能事件。如用安全系数的概念来说，则计算安全系数小于 1 的概率等于零。

在图 1.1.2-2 b)中，两概率密度曲线有互相重叠的部分。很明显在此情况下，虽然工作应力的平均值$\bar{s}$仍远小于极限应力的平均值$\bar{\sigma}$，但不能绝对保证工作应力在任何情况下都小于极限应力。即使以平均值计算的安全系数$S_{ca}=\frac{\bar{\sigma}}{\bar{s}}>1$，但就总体来说，计算安全系数$S_{ca}$大于 1 的概率是小于 1 的，也就是说，计算安全系数小于 1 的概率不等于零。事实上，受变应力作用的零件开始工作时，两密度函数的曲线并不重叠，但随着工作时间的推移，材料的性能要降低，因而在某一工作期限后，两分布曲线即部分重叠。这就说明了按许用应力法设计时，原认为安全的零件也仍然会发生早期破坏的原因。

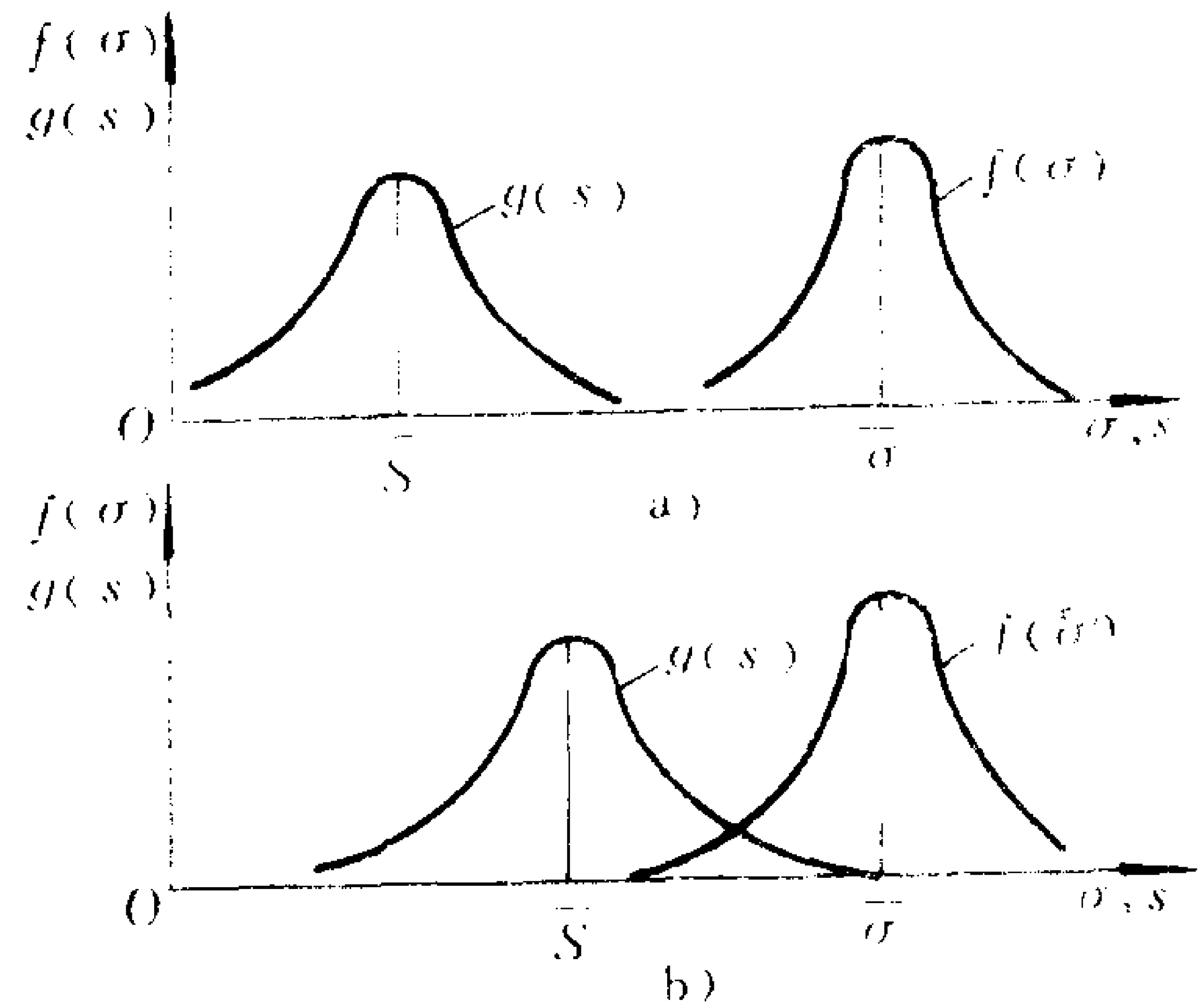


图 1.1.2-2　极限应力的概率密度函数f（σ）与应力的概率密度函数g（s）

既然σ_{lim}与σ均为随机变量，那么，S_{ca}当然也是一个随机变量，故不可能说计算安全系数就取某一固定的值，而只能求出S_{ca}大于某一值的概率是多大，或者说S_{ca}以多大的概率大于某一预先给定的数值。从这一意义上看，我们可以定出一个统计安全系数，定量地表示可靠性为R_t时零件的安全程度，这就是所谓可靠性设计。

可靠性设计通常是用可靠度R_t作为可靠性指标。在规定时间内（或作用次数、距离等）和规定使用条件下，不失效地发挥规定机能的概率称为可靠度。它是衡量产品在寿命方面的质量指标。

设有N_T个零件，在预定时间 t 内，有N_f个零件随机失效，剩下N_s个零件仍能继续工作，

则　　可靠度$R_t=\frac{N_s}{N_T}=\frac{N_T-N_f}{N_T}=1-\frac{N_f}{N_T}$　　(1.1.2-6)

不可靠度（破坏概率）$F_t=\frac{N_f}{N_T}$　　(1.1.2-7)

$$R_t+F_t=1$$

例：用 1000 个零件同时进行试验，，试验到第 200 小时还有 950 个零件未失效，试验到第 500 小时还有 920 个零件未失效。第 200 小时和第 500 小时的可靠度分别为

$$R_{200}=950/1000=95\%$$

$$R_{500}=920/1000=92\%$$

根据概率统计，可求出在不同时间内零件随机失效数N_f的分布曲线，即失效密度曲线，从而可计算出可靠度。常用的分布曲线有正态分布、威布尔分布、指数分布、泊松分布和二项分布等。对机械零件的强度、寿命、工艺误差、测量误差等均可按正态分布。但在变载荷作用下的零、部件的疲劳寿命问题（例如滚动轴承）是最早应用威布尔分布来确定其寿命和

可靠性的。

强度可靠性的计算步骤如下：

1)根据试验或相应的理论分析，找出零件材料的极限应力σ_{lim}的概率密度函数$f(\sigma)$和作用于零件危险剖面上的应力s的概率密度函数 $g(s)$；

2)应用概率论及数理统计，计算零件破坏的概率，即不可靠度F_t；

3)求出零件不破坏的概率，即零件的强度可靠度R_t。

2 凸轮机构

凸轮机构是由凸轮、从动件、机架三个构件组成的高副机构。一般凸轮作主动件，以等速回转，但也有作往复摆动或往复直线移动的。当凸轮运动时，通过其上的曲线或凹槽轮廓和从动件高副接触，使从动件得到预期的运动。

2.1 常见凸轮机构的类型及其主要特点

1)平面凸轮机构　从动件的运动，位于垂直于凸轮轴的平面内。例如船上柴油机上的凸轮机构。

2)空间凸轮机构　从动件在平行于凸轮轴线或包括其轴线的平面内运动。

2.1.1 常见平面凸轮机构的类型及其主要特点，见表 1.1.2-1。

2.1.2 常见空间凸轮机构的类型及其主要特点，见表 1.1.2-2。

2.2 理论廓线、实际廓线、基圆、根圆、节点、节圆、压力角

凸轮机构运转时，见图 1.1.2-3 从动件的尖端点在凸轮上所描绘的轨迹（图中 1.2.3.…12）所连接的曲线，称为凸轮的“理论廓线”或称“节线”。理论廓线上的最小半径r_b所构成的圆称为“基圆”。实际的工作轮廓线(图中一系列滚子圆的圆族内包络线）称为“实际廓线”。实际廓线上最小半径r_0所作的圆称为“根圆”。

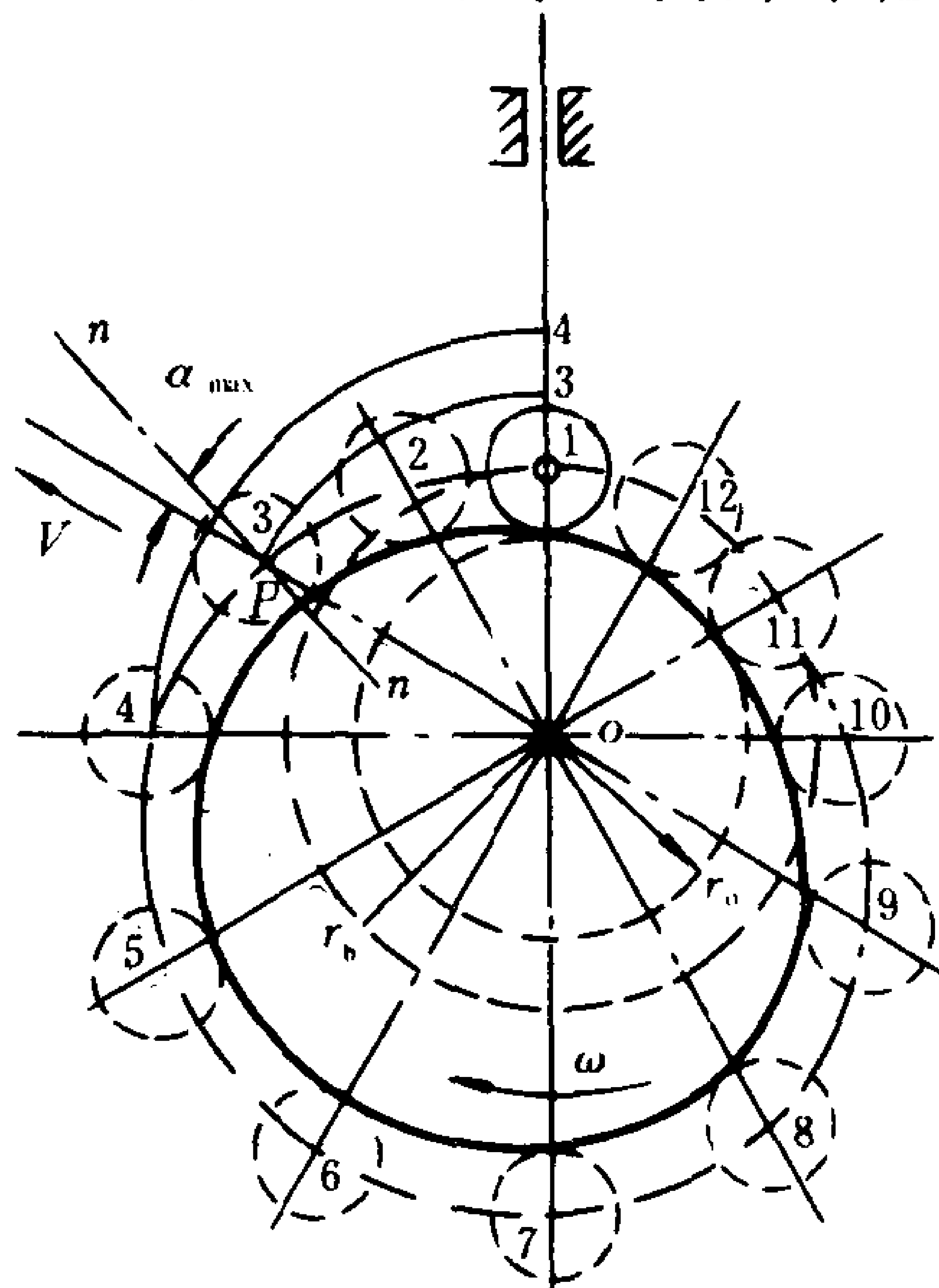


图 1.1.2-3　滚子从动件盘状凸轮机构

凸轮和从动件接触点的公法线nn与从动件速度V方向间所夹的锐角称为“压力角”（见图 1.1.2-3)。凸轮转到不同位置其压力角一般是不同的。增大压力角会使从动件支承处有害阻力增加，使凸轮推动从动件更加费劲，当压力角增大至极限压力角时，机构会出现自锁现象，因此设计时限制其最大压力角使它小于或等于许用压力角，即$\alpha_{max}\leq[\alpha]$。一般设计时，对于直动从动件推程的许用压力角$[\alpha]\leq30°$，摆动从动件推程许用压力角$[\alpha]\leq40\sim50°$，两者回程均无自锁问题，可取$[\alpha]\leq70°\sim80°$。理论廓线上具有最大压力角的点称为“节点”(图中P点)。凸轮回转中心至节点距离为半径所作的圆称为“节圆”。

表 1.1.2-1　　常见平面凸轮机构的类型及其主要特点

	滚子从动件盘状凸轮	曲面从动件盘状凸轮	平底从动件盘状凸轮	滚子从动件移动凸轮	曲面从动件移动凸轮	平面槽凸轮
直移从动件	a）	b）	c）	d）	i）	j）
	$e=0$ 为对心凸轮机构、偏距 e 的大小和偏向选得恰当，可在相同的许用压力角条件下得到比对心从动件更小的基圆半径 需用弹簧或重力等使凸轮与从动件始终保持接触	可避免用滚子或平底从动件时，因机构变形或安装偏差而使载荷集中、应力增高等缺点	凸轮对平底从动件的作用力始终垂直于平底（若不计摩擦），故受力比较平稳，而且凸轮与平底接触面间容易形成油膜。润滑较好，所以常用于高速，但不能与内凹或直线轮廓接触	因移动凸轮作往复运动，故不宜用于高速	制造简单，精度较高，但不宜于高速	从动件上的滚子嵌于凸轮的槽中以保持两者接触，凸轮槽与从动件上的滚子配合精度要求较高
摆动从动件	e）	f）	g）	h）	k）	l）
	摆动从动件比直移从动件较易制造，摩擦阻力也较小，需用弹簧或重力使凸轮与从动件始终保持接触			从动件受力情况较好，不易发生自锁，但不宜于高速	从动件受力情况较好，不易发生自锁，不宜于高速	凸轮槽与从动件上的滚子配合精度要求较高

表 1.1.2-2　**常见空间凸轮机构的类型及其主要特点**

	滚子从动件圆柱凸轮	滚子从动件圆锥凸轮		滚子从动件圆柱凸轮
直移从动件	a)	b)	摆动从动件	c)
	可使从动件得到较大的行程。从动件上的滚子必须在凸轮槽间滚动，因此配合精度要求较高	可使从动件得到较大的行程，滚子与凸轮间的配合精度要求较高		摆角ψ不宜过大，从动件上的滚子嵌于凸轮槽中，因此它们的配合精度要求较高

2.3　基圆半径与压力角

图 1.1.2-4、是偏置滚子从动件盘状凸轮机构，有：

$$\mathrm{tg}\alpha=\frac{\frac{ds}{d\theta}\mp e}{\sqrt{r_b^2-e^2}-s} \tag{1.1.2-8}$$

式中，α为凸轮机构的压力角、s为从动件的位移、e为偏置量、θ为凸轮转角、r_b为基圆半径。正负号的取法是：若凸轮逆时针方向转动，又当从动件偏在凸轮轴心右侧时，推程取负号，回程取正号。偏在左侧时，推程取正号，回程取负号。若凸轮顺时针转动，符号取法与上述相反。

当$e=0$，则　$$\mathrm{tg}\alpha=\frac{\frac{ds}{d\theta}}{r_b+s} \tag{1.1.2-9}$$

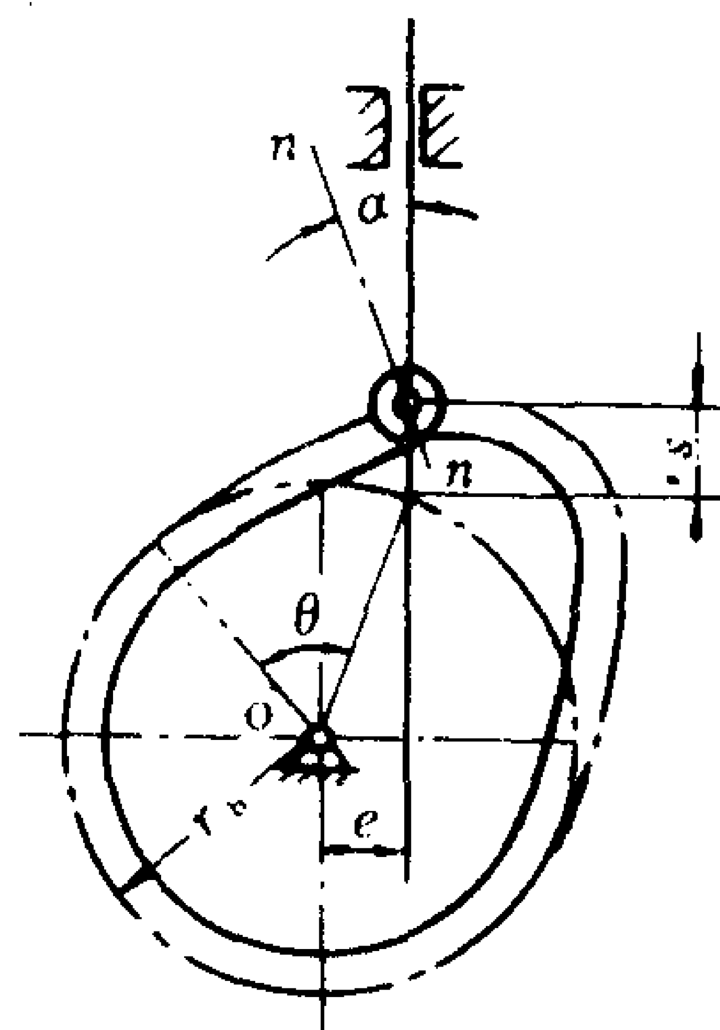


图 1.1.2-4　盘状凸轮机构基圆半径与压力角的关系图

由式可知，当运动规律确定后，压力角α随基圆半径r_b增大而减小，凸轮的基圆半径愈小，凸轮机构的尺寸愈紧凑。图 1.1.2-5为对心直移滚子从动件盘状凸轮机构的诺模图，可近似地确定凸轮基圆半径以及校核其最大压力角α_{max}。

例：要求凸轮转动角$\Phi=100°$时，直移从动件以简谐运动规律上升的最大升程为$h=30$ mm，许用压力角$[\alpha]=30°$，则可利用图 1.1.2-5 b)给出的诺模图定出凸轮的基圆半径r_b，为此，图中$\alpha_{max}=30°$和$\Phi=100°$两点以直线相联，交简谐运动规律的标尺于 0.9，根据$\frac{h}{r_b}=0.9$，可得$r_b=\frac{30}{0.9}=34$ mm。

在实际设计凸轮时，凸轮实际廓线的最小半径r_0通常可先根据具体结构条件初步选定。例如，当凸轮与轴做成整体时，凸轮的实际廓线的最小半径应选得略大于轴的半径，若凸轮要单独制造，然后再装配到凸轮轴上去时，凸轮实际廓线的最小半径，可取轴的半径的 1.6～2 倍，然后再校核最大压力角是否大于许用值，若$\alpha_{max}>[\alpha]$时，

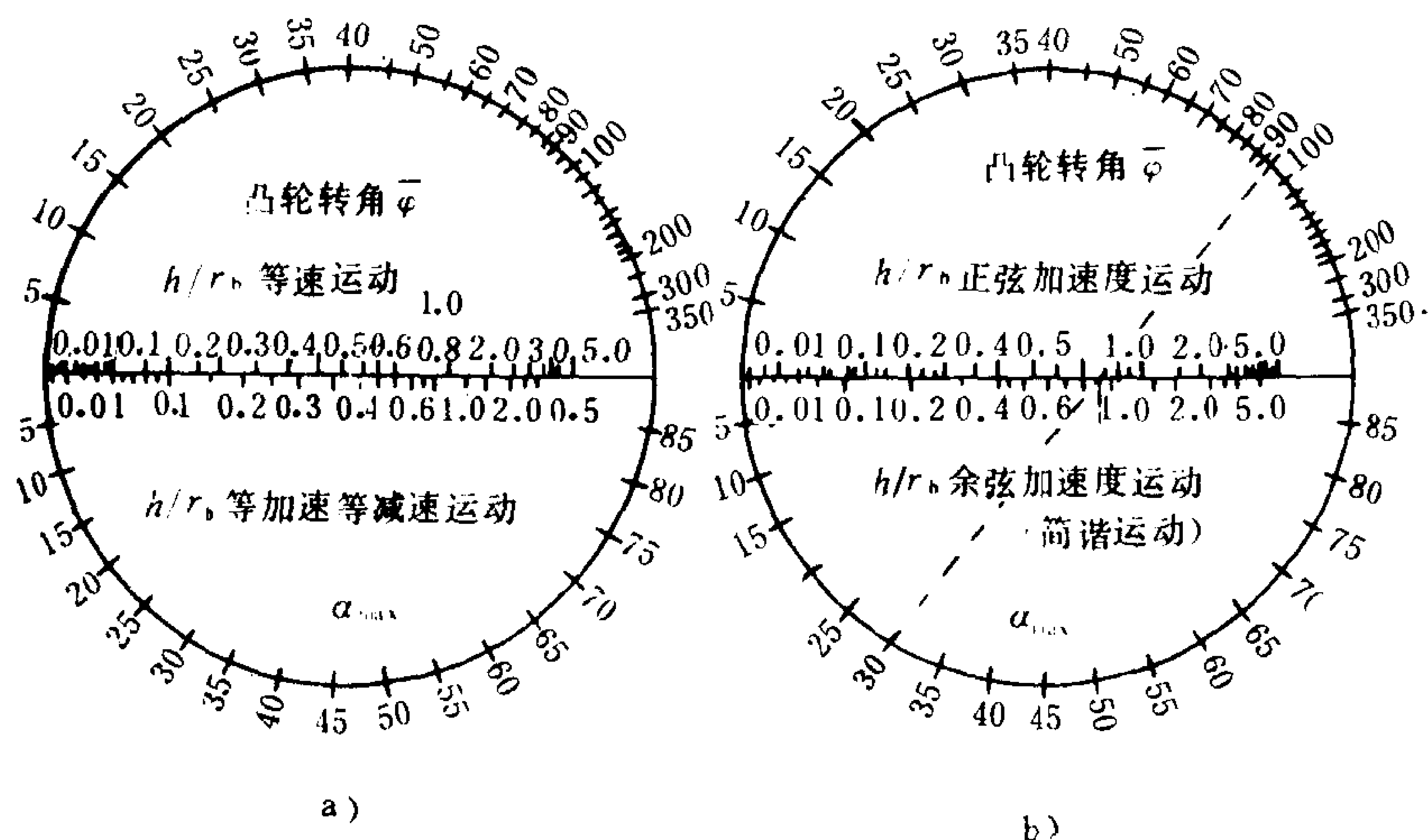


图 1.1.2-5　对心直移滚子从动件盘状凸轮机构的诺模图

a）等速运动及等加速等减速运动；b）正弦加速度及余弦加速度运动

则须将初选尺寸适当放大，然后再重新设计。

2.4　盘状凸轮理论廓线的最小曲率半径ρ_{min}和滚子半径r_T

若采用滚子从动件与盘状凸轮相接触，在决定理论廓线的曲率半径ρ时，应考虑到防止凸轮实际廓线变尖及从动件预期的运动规律失真。

对于凸轮表面为外凸的曲面时，当理论廓线的曲率半径ρ大于滚子半径r_T，即：$\rho > r_T$，其实际廓线总是可以根据理论廓线作出的，如图 1.1.2-6 a)所示。当理论廓线的曲率半径等于滚子半径，即：$\rho = r_T$时，凸轮的实际廓线会变尖，如图 1.1.2-6 b）当$\rho < r_T$时，使得从动件不能按预期的运动规律运动，导致运动失真。如图 1.1.2-6 c)综上所述，欲保证任何处廓线都不发生变尖和产生失真现象，滚子半径r_T必须小于理论轮廓外凸部分的最小曲率半径ρ_{min} 通常设计时取滚子半径$r_T \leq 0.8\rho_{min}$。

2.5　推程中从动件常用的运动规律及其应用范围

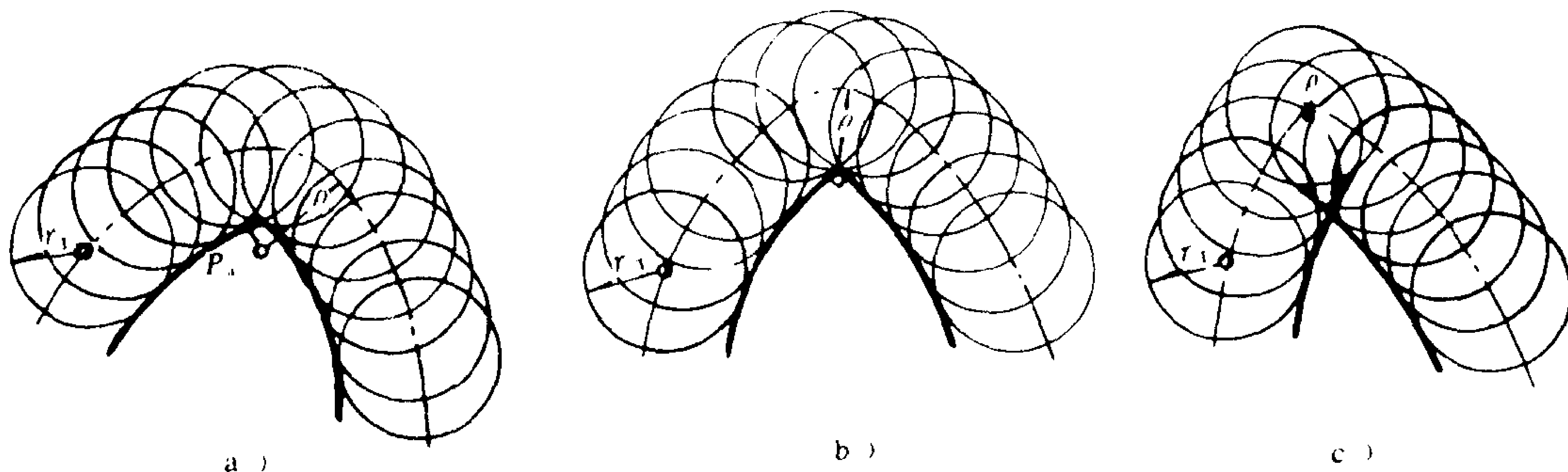


图 1.1.2-6　凸轮理论廓线的最小曲率半径及滚子半径的关系

a)$\rho > r_T$；b)$\rho = r_T$；c)$\rho < r_T$

表 1.1.2-3　推程中从动件常用的运动规律

运动规律	运动线图	运动方程
等速运动	a）	$S=h\theta/\Phi$ $V=\omega h/\Phi$ $a=0$
等加速等减速	b） 横坐标作偶数等分（图中6等分），纵坐标按1：4：9…9：4：1分（图中按1：4：9：9：4：1分）	$\theta\leq\frac{1}{2}\Phi$：$S=\frac{2h}{\Phi^2}\theta^2$ $V=\frac{4h\omega}{\Phi^2}\theta$ $a=\frac{4h\omega^2}{\Phi^2}$ $\theta\geq\frac{1}{2}\Phi$：$S=h-\frac{2h}{\Phi^2}(\Phi-\theta)^2$ $V=\frac{4h\omega}{\Phi^2}(\Phi-\theta)$ $a=-\frac{4h\omega^2}{\Phi^2}$
简谐运动（余弦加速度）	c） 沿半圆弧等分为θ坐标的相同的等分（图中为6等分）	$S=\frac{h}{2}(1-\cos\frac{\pi}{\Phi}\theta)$ $V=\frac{h\pi\omega}{2\Phi}\sin\frac{\pi}{\Phi}\theta$ $a=\frac{h\pi^2\omega^2}{2\Phi^2}\cos\frac{\pi}{\Phi}\theta$
摆线（正弦加速度）	d） 以$h/2\pi$为半径作圆，圆周上的等分数与横坐标等分数相同，圆周上各分点向纵轴上投影，从垂足作对角线06之平行线，交出位移曲线	$S=\frac{h}{\pi}(\frac{\pi\theta}{\Phi}-\frac{1}{2}\sin\frac{2\pi\theta}{\Phi})$ $V=\frac{h\omega}{\Phi}(1-\cos\frac{2\pi\theta}{\Phi})$ $a=\frac{2h\pi\omega^2}{\Phi^2}\sin\frac{2\pi\theta}{\Phi}$

注：单位：位移S为mm，速度V为mm/s，加速度a为mm/s²、同一式中θ、Φ、ω用相同的角度单位。h为从动件最大升程。Φ为凸轮设计时的预定转角。θ为凸轮的任意转角，ω为凸轮的角速度。

表 1.1.2-4　　　　从动件常用的运动规律特性比较

运动规律	$V_{max}=(h\omega/\Phi)\times$	$a_{max}=(\frac{h\omega^2}{\Phi^2})\times$	冲击	应用范围
等速运动	1.00	∞	刚性	低速轻载
等加速等减速	2.00	4.00	柔性	中速轻载
简谐（余弦加速度）	1.57	4.93	柔性	中速中载
摆线（正弦加速度）	2.00	6.28	—	中高速轻载
3-4-5 多项式	1.88	5.77	—	高速中载
变形正弦加速度	1.76	5.53	—	中高速重载

3　齿轮机构和轮系

3.1　齿轮机构

在机械中齿轮机构是用来传递任意两轴间的运动和动力的，它是一种广泛应用的机构。

3.1.1　齿轮机构传动的类型及其传动特点

类型见表 1.1.2-5

表 1.1.2-5　　　　齿轮机构的类型两齿轮轴线的相对位置

平　　行	相　　交	交　　错
直齿圆柱齿轮传动 斜齿圆柱齿轮传动 人字齿轮传动 圆弧圆柱齿轮传动 非圆齿轮传动 其　　它	直齿圆锥齿轮传动 斜齿圆锥齿轮传动 曲线圆锥齿轮传动	圆柱螺旋齿轮传动 双曲面齿轮传动 圆柱蜗杆传动 单包围弧面蜗杆传动 双包围弧面蜗杆传动 锥蜗杆传动

传动特点（和带传动、链传动及摩擦轮传动比较）

1)两轮瞬时传动比恒定不变，即当主动轮等速回转时，从动轮也作等速回转，这样就可以使机械运转有较高的平稳性。对于非圆齿轮传动，可以按照预定传动比变化规律来设计。

2)传递功率和齿轮的节圆线速度范围大，传递功率可以小于一瓦，高的可达几万千瓦，圆周线速度可以从很低到高速，甚至可高达 300 m/s。

3)传动效率高，一对渐开线圆柱齿轮，如加工和安装精度高，其传动效率可达 99%以上。

4)结构紧凑，工作可靠，它适宜于近距离传动。

5)制造和安装精度要求高，特别对精度要求高的齿轮，需用高精度的机床及刀具来加工，并且工艺繁复，故费用昂贵。

6)过载时，不能像带传动、摩擦轮传动那样会打滑，因而它无保护作用。

3.1.2　渐开线圆柱齿轮的基准齿形及模数系列

表 1.1.2-6　　基准齿形及齿形参数（GB 1356—78）

基准齿形	参数名称	代号	数值	说明
	齿形角	α	20°	
	齿顶高	h_a	$h_a^* m$	齿顶高系数 $h_a^*=1$
	工作齿高	h'	$2h_a^* m$	工作齿高部分的齿形是直线
	齿距	p	πm	中线上的齿厚和齿槽宽相等
	径向间隙	c	$c^* m$	径向间隙系数 $c^*=0.25$
	齿根圆角半径	ρ_f	0.38 m	

注：1. 基准齿形指基准齿条的法面齿形，其参数值适用于模数 $m>1$ mm的渐开线圆柱齿轮传动。

2. 考虑到某些工艺要求，径向间隙 c 允许增大至 0.35 m，齿根圆角半径 ρ_f 允许减小至 0.25 m。

3. 为提高齿根强度，在传动时不产生干涉的条件下，允许增大齿根圆角半径，也允许做成单圆弧。

4. 需采用短齿时，相应的参数为：$h_a=0.8$ m，$h'=1.6$ m，$c=0.3$ m，$\rho_f=0.46$ m。

5. 为提高轮齿的综合强度需增大齿形角时，推荐 $\alpha=25°$，$h_a=$m，$h'=2$m，$c=0.2$ m，$\rho_f=0.35$ m，齿根圆角半径为单圆弧。

6. 为改善传动质量允许齿顶修缘。

表 1.1.2-7　　齿轮模数系列（GB 1357—78）

第一系列	1.25	1.5		2		2.5		3				4
第二系列			1.75		2.25		2.75		(3.25)	3.5	(3.75)	
第一系列		5		6			8		10		12	
第二系列	4.5		5.5		(6.5)	7		9		(11)		14
第一系列	16		20		25			32		40		50
第二系列		18		22		28	(30)		36		45	

注：1. 对斜齿圆柱齿轮是指法面模数 m_n；

2. 优先选用第一系列，括号内数值尽可能不用。

采用英制单位的国家，用径节作为计算齿轮几何尺寸的基础，径节 P 是齿数 z 对分度圆直径 d（英寸）之比，即每英寸分度圆直径应有的齿数。

$$P=\frac{z}{d}=\frac{\pi}{p}\ \left(\frac{1}{\text{英寸}}\right) \tag{1.1.2-10}$$

p 为分度圆周节，模数 m 与径节 P 的关系：

$$m=\frac{25.4}{P}\ \text{mm} \tag{1.1.2-11}$$

标准径节值为：1，1.25，1.5，1.75，2，2.25，2.5，3，3.5，4，5，6，7，8，9，10

英制中的压力角，除采用 $\alpha=20°$ 外，还有 $14\frac{1}{2}$、15°等。

径节制的标准齿轮，其各部分尺寸为：

$$\left.\begin{aligned} &h_a\ (\text{齿顶高})=\frac{h_a^*}{P} \qquad h_f\ (\text{齿根高})=\frac{h_f^*}{P} \\ &d_a\ (\text{齿顶圆直径})=\frac{z\pm 2h_a^*}{P} \qquad d_f\ (\text{齿根圆直径})=\frac{z\mp 2h_f^*}{P} \end{aligned}\right\} \tag{1.1.2-12}$$

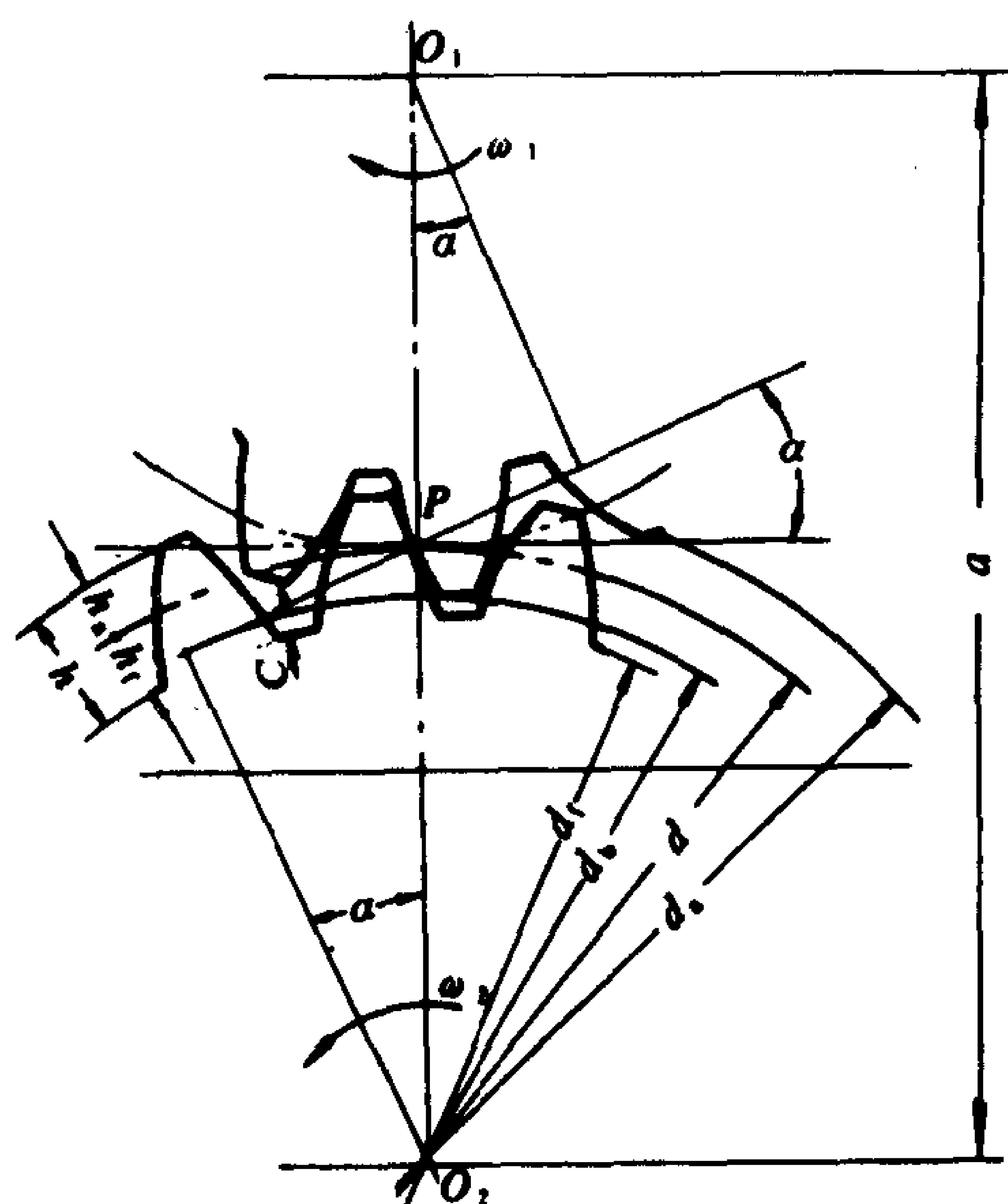
式中上面的符号适用于外齿轮，下面的符号适用于内齿轮对于正常齿、$h_a^*=1$ 及 $h_f^*=1.157$；而对于短齿，$h_a^*=0.8$ 及 $h_f^*=1$

某些工业部门中，由于特殊需要，还使用了非标准齿形，其压力角$\alpha=22\frac{1}{2}^{\circ}$或25°、28°。齿顶高系数$h_a^*$有0.8或0.9、1.2的。有时还使用双模数制(即m_1/m_2、如3/2.25、4/3…其中m_1用来计算分度圆直径，m_2用来计算齿高)，及双径节制。(P_1/P_2，其中P_1用来计算分度圆直径，P_2用来计算齿高)。

3.1.3 标准圆柱齿的几何尺寸计算

外啮合标准直齿、斜齿(人字齿)圆柱齿轮传动几何尺寸计算见表1.1.2-8；内啮合标准直齿、斜齿（人字齿）圆柱齿轮传动几何尺寸计算见表1.1.2-9。

表1.1.2-8　外啮合标准直齿、斜齿（人字齿）圆柱齿轮传动几何尺寸计算

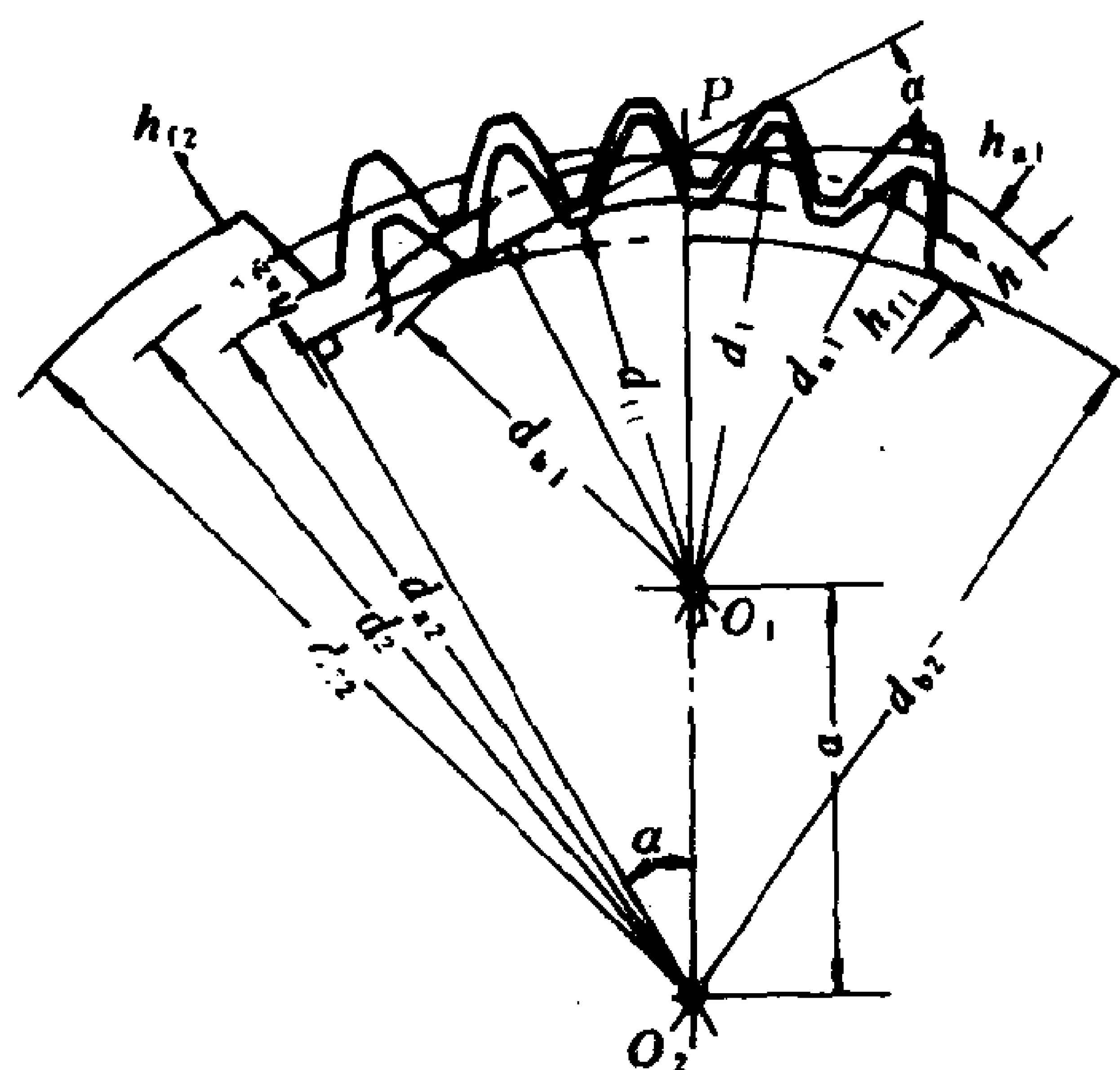


序号	名　称	符号	直齿轮计算公式	斜齿（人字齿）轮计算公式
1	模数	m	根据齿轮强度计算定出并由表1.1.2-7选取标准值	$m_t=\frac{m_n}{\cos\beta}$（$m_t$为端面模数）法面模数$m_n$由强度计算而定并由表1.1.2-7取标准值
2	压力角	α	$\alpha=20^{\circ}$	$\alpha_n=20^{\circ}$（法面压力角） $\mathrm{tg}\alpha_t=\frac{\mathrm{tg}\alpha_n}{\cos\beta}$ α_t为端面压力角
3	螺旋角	β	$\beta=0$	$\beta_1=-\beta_2=\beta$　一般取$\beta=8^{\circ}\sim20^{\circ}$
4	齿数	z	z	
5	分度圆直径	d	$d=mz$	$d=m_tz$ $=\frac{m_n}{\cos\beta}z$
6	齿顶高	h_a	$h_a=h_a^*m$ 正常齿$h_a^*=1$	$h_a=h_{at}^*m_t$ $=h_{an}^*m_n$（$h_{an}^*=1$）
7	齿根高	h_f	$h_f=(h_a^*+c^*)\ m$ $h_a^*=1\quad c^*=0.25$	$h_f=(h_{at}^*+c_t^*)\ m_t=(h_{an}^*+c_n^*)\ m_n$ ($h_{an}^*=1\quad c_n^*=0.25$)

序号	名　称	符号	直齿轮计算公式	斜齿（人字齿）轮计算公式
8	全齿高	h	$h=h_a+h_f$	
9	径向间隙	c	$c=c^*m$　（$c^*=0.25$）	$c=c_t^*m_t$ $=c_n^*m_n$（$c_n^*=0.25$）
10	齿顶圆直径	d_a	$d_a=d+2h_a$ $=m(z+2h_a^*)$	$d_a=d+2h_a$ $=m_n(\frac{z}{\cos\beta}+2h_{an}^*)$
11	齿根圆直径	d_f	$d_f=d-2h_f$ $=m(z-2h_a^*+2c^*)$	$d_f=d-2h_f$ $=m_n(\frac{z}{\cos\beta}-2h_{an}^*-2c_n^*)$
12	基圆直径	d_b	$d_b=d\cos\alpha$	$d_b=d\cos\alpha_t$
13	周节	p	$p=\pi m$	$p_t=\pi m_t$（p_t为端面周节） $p_n=\pi m_n$（p_n为法面周节）
14	标准中心距	a	$a=\frac{m}{2}(z_1+z_2)$	$a=\frac{m_t}{2}(z_1+z_2)=\frac{m_n}{2\cos\beta}(z_1+z_2)$
15	齿数比	u	$u=\frac{z_2}{z_1}$	$u=\frac{z_2}{z_1}$
16	齿顶压力角	α_a	$\alpha_a=\cos^{-1}\frac{d_b}{d_a}$	$\alpha_{at}=\cos^{-1}\frac{d_b}{d_a}$（$\alpha_{at}$为端面齿顶压力角）
17	重合度	ε	$\varepsilon=\frac{1}{2\pi}[z_1(\mathrm{tg}\alpha_{a_1}-\mathrm{tg}\alpha)+z_2(\mathrm{tg}\alpha_{a_2}-\mathrm{tg}\alpha)]$	$\varepsilon=\frac{1}{2\pi}[z_1(\mathrm{tg}\alpha_{at_1}-\mathrm{tg}\alpha_t)+z_2(\mathrm{tg}\alpha_{at_2}-\mathrm{tg}\alpha_t)]+\frac{b\sin\beta}{\pi m_n}$　b为齿宽
18	当量齿数	z_v	$z_v=z$	$z_v\approx\frac{z}{\cos^3\beta}$

注　c_t^*、c_n^* 分别为端面及法面径向间隙系数，h_{an}^*、h_{at}^*分别为法面及端面齿顶高系数。

表 1.1.2-9　　内啮合标准直齿、斜齿（人字齿）圆柱齿轮传动几何尺寸计算



序号	名　称	符号	直齿轮计算公式	斜齿（人字齿）轮计算公式
1	模数	m	根据强度计算定出，并从表 1.1.2-7 选取标准值	$m_t=\frac{m_n}{\cos\beta}$ 法面模数m_n由强度计算而定，并从表 1.1.2-7 选取标准值

续上表

序号	名　　称	符号	直齿轮计算公式	斜齿（人字齿）轮计算公式
2	压力角	α	$\alpha=20^\circ$	$\alpha_n=20^\circ$ $\mathrm{tg}\alpha_t=\dfrac{\mathrm{tg}\alpha_n}{\cos\beta}$ α_t为端面压力角
3	螺旋角	β	$\beta=0$	$\beta_1=\quad\beta_2=\beta$　一般$\beta=8^\circ\sim20^\circ$
4	齿数	z	z	
5	分度圆直径	d	$d_1=mz_1\quad d_2=mz_2$	$d_1=m_tz_1=\dfrac{m_n}{\cos\beta}z_1$ $d_2=m_tz_2=\dfrac{m_n}{\cos\beta}z_2$
6	基圆直径	d_b	$d_{b_1}=d_1\cos\alpha\quad d_{b_2}=d_2\cos\alpha$	$d_{b1}=d_1\cos\alpha_t$ $d_{b2}=d_2\cos\alpha_t$
7	齿根圆直径	d_{f1}	$d_{f1}=d_1-2\ (h_a^*+c^*)\ m$	$d_{f1}=d_1-2\ (h_{an}^*+c_n^*)\ m_n$
		d_{f2}	$d_{f2}=d_2+2\ (h_a^*+c^*)\ m$	$d_{f2}=d_2+2\ (h_{an}^*+c_n^*)m_n$
8	齿顶圆直径	d_a	$d_{a1}=d_1+2h_a^*m$ $d_{a2}=d_2-2h_a^*m+\Delta d_a$	$d_{a1}=d_1+2h_{an}^*\ m_n$ $d_{a2}=d_2-2h_{an}^*\ m_n+\Delta d_a$
			为防止过渡曲线干涉$z_2\geq22$时，齿顶圆直径d_{a2}应增大Δd_a	
			当$h_a^*=1\quad\alpha=20^\circ$时　$\Delta d_a=\dfrac{1.51m}{z_2}$	当$h_{an}^*=1\quad\alpha_n=20^\circ\quad\Delta d_a=\dfrac{1.51m_n\cos^3\beta}{z_2}$
9	全齿高	h	$h_1=0.5\ (d_{a1}-d_{f1})\qquad h_2=0.5\ (d_{f2}-d_{a2})$	
10	齿顶高	h_a	$h_{a1}=0.5\ (d_{a1}-d_1)\qquad h_{a2}=0.5\ (d_2-d_{a2})$	
11	中心距	a	$a=\dfrac{m}{2}\ (z_2-z_1)$	$a=\dfrac{m_n}{2\cos\beta}\ (z_2-z_1)$
12	齿数比	u	$u=\dfrac{z_2}{z_1}$	
13	当量齿数	z_v	$z_v=z$	$z_{v_1}\approx\dfrac{z_1}{\cos^3\beta}\quad z_{v_2}\approx\dfrac{z_2}{\cos^3\beta}$
14	重合度	ε	$\varepsilon=\dfrac{1}{2\pi}\ [z_1\ (\mathrm{tg}\alpha_{a1}-\mathrm{tg}\alpha)\ -z_2\ (\mathrm{tg}\alpha_{a2}-\mathrm{tg}\alpha)]$	$\varepsilon=\dfrac{1}{2\pi}\ [z_1\ (\mathrm{tg}\alpha_{at1}-\mathrm{tg}\alpha_t)\ -z_2\ (\mathrm{tg}\alpha_{at2}-\mathrm{tg}\alpha_t)]\ +\dfrac{b\sin\beta}{\pi m_n}$

3.1.4 变位齿轮概述

1）齿轮变位的目的

（1）提高齿根的弯曲强度和齿面的接触强度。

（2）提高齿面的抗胶合能力和耐磨性。

（3）凑中心距。

（4）由于标准齿轮的齿数$z<z_{\min}$时，会产生根切，通过对齿轮的变位修正，可避免产生根切。

（5）在满足承载能力的条件下，可减小齿轮机构的尺寸和重量。

2）变位修正原理

用范成法切制标准齿轮时，刀具的中线应与被加工齿轮的分度圆相切，见图 1.1.2-7 虚线所示，若刀具的齿顶线与啮合线的交点B_2超过了被切齿轮的极限点N_1时，则刀具的齿顶将

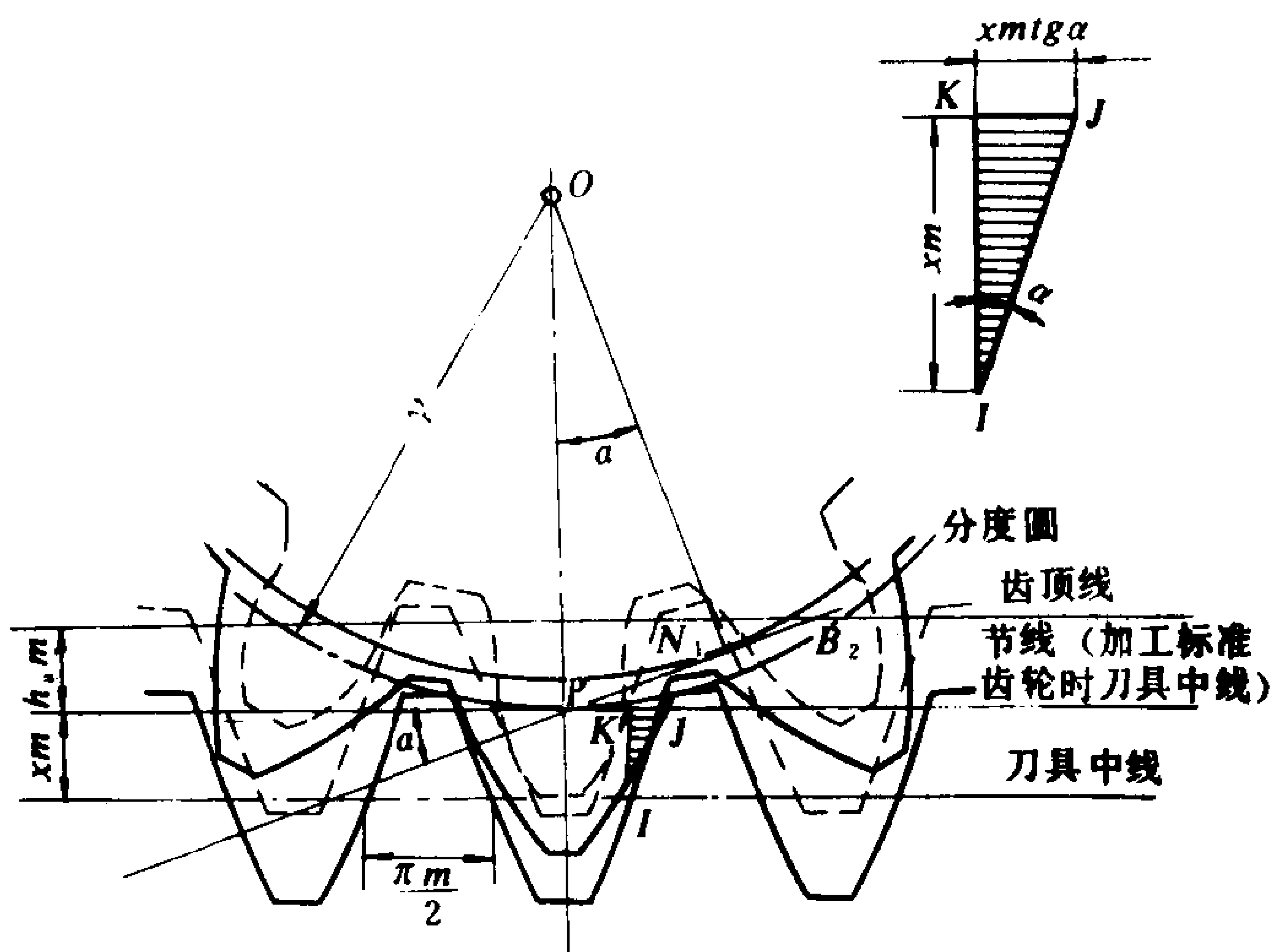


图 1.1.2-7　变位齿轮形成原理

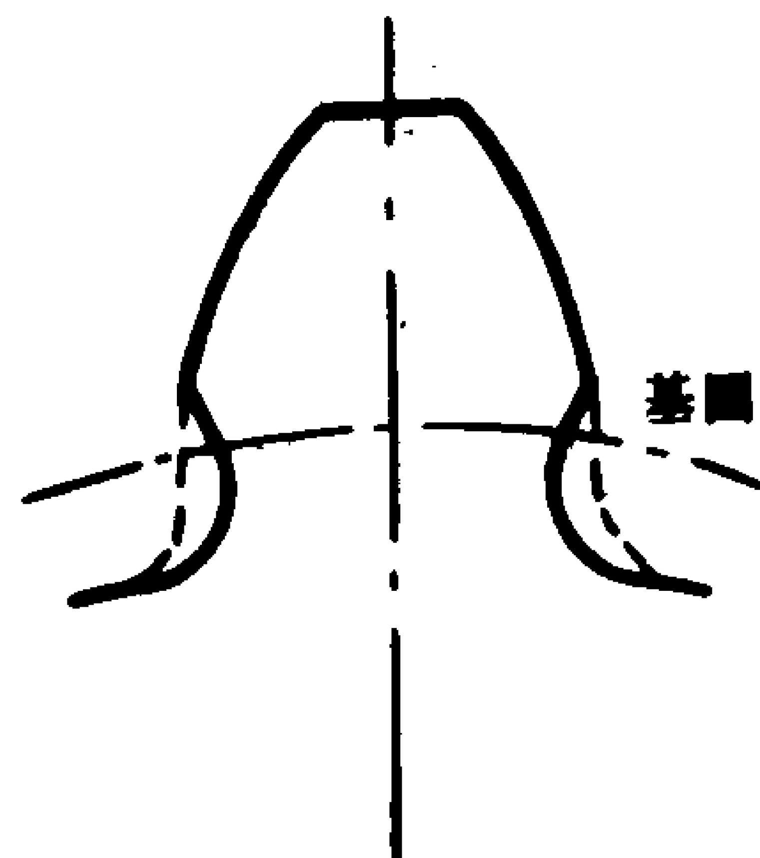


图 1.1.2-8　根切轮齿

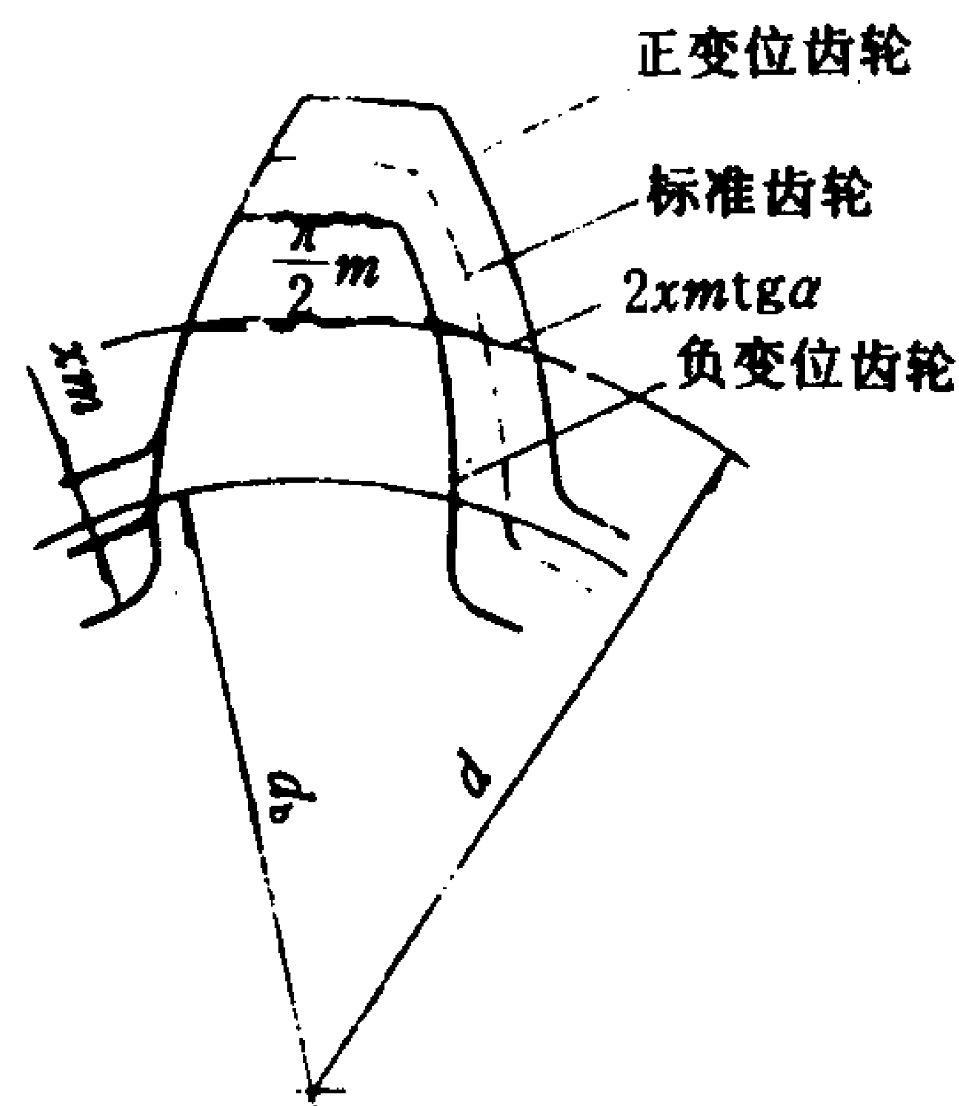


图 1.1.2-9　标准齿轮与变位齿轮的齿廓曲线

被切齿轮齿根的渐开线切去了一部分(如图中虚线)，这种现象，称为根切。经根切了的齿轮（图 1.1.2-8）齿根部分的弯曲强度必将削弱，并且传动时也降低了重合度，影响齿轮传动质量，为了避免产生根切，只要将刀具的齿顶线与啮合线的交点，不超过啮合极限点N_1，亦即改变刀具与轮坯的相对位置，将刀具向下移动xm的量（刀具中线向下移xm），此时被加工齿轮的齿顶圆也相应地做得大些。经移距加工的轮齿，图 1.1.2-7 实线所示，不产生根切了。这样制得的齿轮，有些尺寸已非标准值，称为变位齿轮。

以切削标准齿轮的位置为基准、刀具所移动的距离xm，称为刀具的移距，而x称为移距系数，并规定刀具远离被加工齿轮中心的移距系数为正，所切削的齿轮，称为正变位齿轮，反之，靠近为负，所切削的齿轮，称为负变位齿轮。

切削变位齿轮和切削标准齿轮所用的刀具是一样的。其分度运动的传动比也是一样的，所以两者的模数和压力角相同，因此它们的分度圆和基圆也相同，由此可知，变位齿轮的齿廓曲线和标准齿轮的齿廓曲线是同一基圆展开的渐开线，仅仅所截取的部位不同而已，如图 1.1.2-9。

经正变位的齿轮、其分度圆上的齿厚比标准齿轮增大 $2xm\mathrm{tg}\alpha$，齿根高减少xm；负变位的齿轮，其分度圆上的齿厚减少 $2xm\mathrm{tg}\alpha$，齿根高增加xm。

3.1.5　变位齿轮传动的类型及变位系数的选择

1）变位齿轮传动的类型及主要优缺点见表 1.1.2-10

表 1.1.2-10　　**变位齿轮传动的类型及其优缺点比较**

名称	传动类型			
	标准齿轮正确安装	高变位传动（零传动）	角变位传动	
	$x_1=x_2=0$	$x_1+x_2=0$ $x_1=-x_2$	$x_1+x_2>0$　正传动	$x_1+x_2<0$　负传动
附图	a）	b）	c）	d）
齿数条件	① $z_1>z_{min}$、$z_2>z_{min}$	$z_1+z_2\geq 2z_{min}$	$z_1+z_2\leq 2z_{min}$ 或$z_1+z_2>2z_{min}$	$z_1+z_2>2z_{min}$
优缺点	中心距为标准中心距a，啮合角等于分度圆上压力角，分度圆与节圆重合 优点：互换性好 缺点：材料相同的一对齿轮，小齿轮的弯曲强度和接触强度均比大齿轮低，磨损亦比大齿轮严重	中心距等于标准中心距a，分度圆与节圆重合，齿顶高、齿根高非标准值，但全齿高仍为标准值 优点：当$z_1<z_{min}$采用此种传动，可减小齿轮机构的尺寸，合理地调整两轮的磨损，适当地选择变位系数，可提高轮齿的承载能力 缺点：无互换性，且小齿轮轮齿容易变尖	中心距a'大于标准中心距a，分度圆小于节圆，两轮的齿顶高、齿根高均非标准值 优点：提高了齿面的接触强度和轮齿的抗弯曲强度，合理选择变位系数能改善齿面的磨损程度，可配凑中心距 缺点：无互换性重合度减小，正变位太大时轮齿的齿顶也易变尖。	中心距a'小于标准中心距a，分度圆大于节圆，两轮的齿顶高、齿根高均非标准值 优点：重合度略有增加 缺点：齿面接触强度和弯曲强度都降低，齿面磨损严重，无互换性，只有在$a'<a$时才采用

① z_{min}为不产生根切的最少齿数，用齿条型刀具加工标准齿轮时，$z_{min}=2h_a^*/\sin 2\alpha$，当$h_a^*=1$　$\alpha=20°$时，$z_{min}\approx 17$齿。

2）变位系数的选择

在设计变位齿轮时，变位系数的选择对齿轮传动质量起着主要的作用。由于机器的工作条件不同，因而对齿轮传动的设计要求也是不同的。有要求提高齿面抗点蚀能力的；有要求提高轮齿抗折断能力的；有要求提高齿面抗磨损抗胶合能力的；有要求增大重合度的；有要求减小齿轮机构尺寸的；也有要求配凑中心距的；甚至有多方面要求的，因此就应从全局出发，分清主次，在满足主要要求的条件下，对次要要求亦给以适当的考虑。

通常可用线图确定变位系数。在设计变位齿轮传动时，可利用“封闭图”选择变位系数，亦可用线图来选取变位系数，图 1.1.2-10 是用齿条型刀具加工外啮合齿轮时供选择的变位系数线图，该线图用于小齿轮的齿数$z_1\geq 12$，该图分左、右两部分，右边线图横坐标为两轮齿数

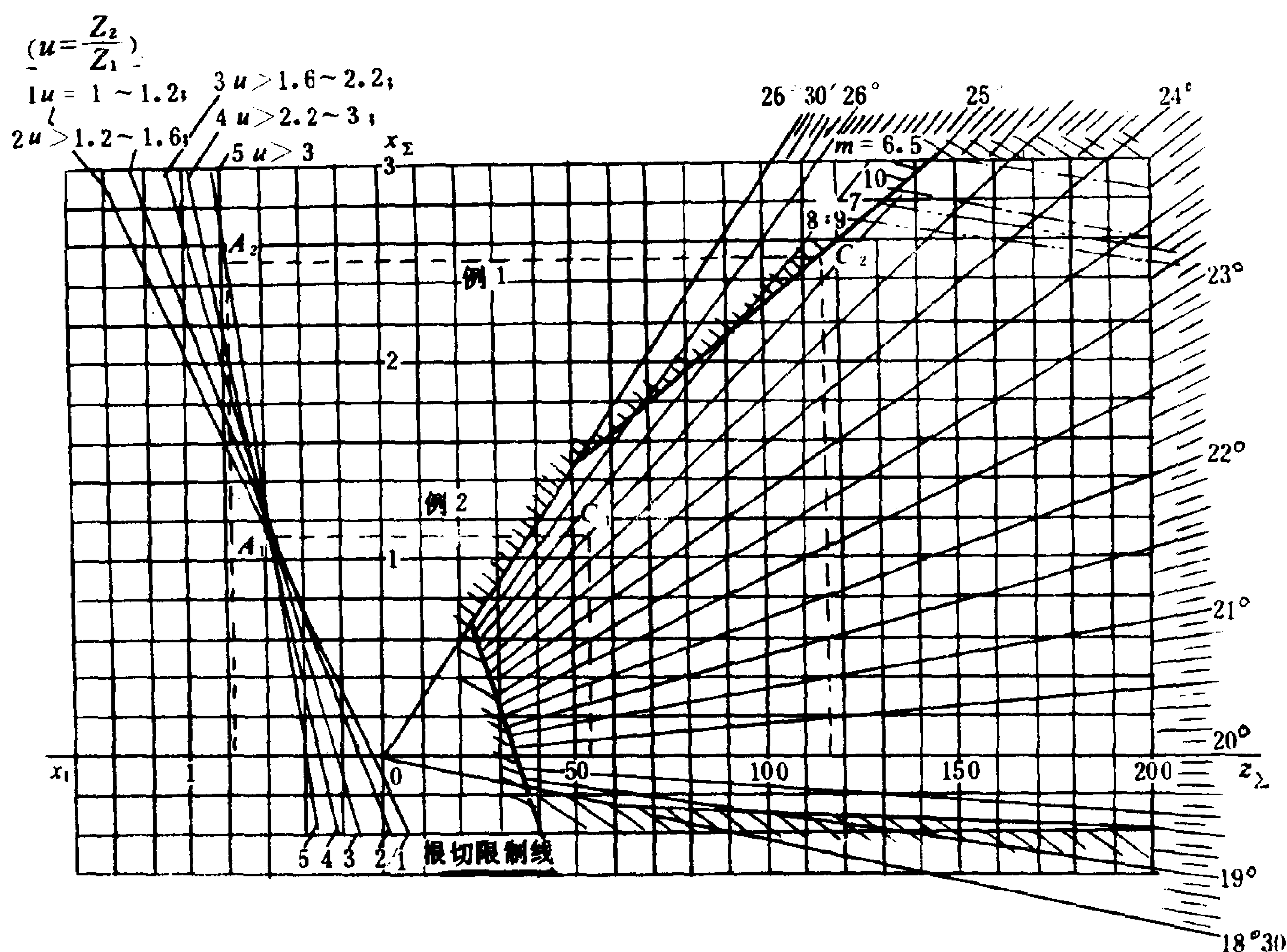


图 1.1.2-10　确定变位系数的线图

和z_Σ，纵坐标为两轮变位系数之和x_Σ，阴影线内的区域为许用区，许用区内的各射线为一系列啮合角的度数（如 18°、19°、…24°、25°等）与z_Σ的函数曲线，左边线图的横坐标为x_1，x_1以坐标原点向左取正值，纵坐标仍为变位系数和x_Σ。

用该线图选取变位系数时，先按齿数和z_Σ及其它要求在右边的许用区选取合适的变位系数和x_Σ，然后按左边的线图，根据x_Σ及齿数比u即可确定x_1及$x_2=x_\Sigma-x_1$。

按图 1.1.2-10　所示的线图所选择的变位系数可保证；

1)两轮啮合传动时不产生干涉。

2)重合度$\varepsilon \geqq 1.2$（即使在许用区上方的边界线上选取x_Σ时，也只有少数情况下$\varepsilon=1.1\sim1.2$）。

3)切齿时不会产生根切或仅有微量根切。

4)齿顶厚$s_a>0.4\,\mathrm{m}$。

5)在模数限制线（图中$m=6.5$，$m=7\cdots m=10$等线下方取变位系数时，用标准滚刀加工该模数的齿轮不会产生不完全切削现象。

例 1：已知一对外啮合直齿圆柱齿轮传动，齿数$z_1=21$，$z_2=33$，模数$m=2.5$，中心距$a'=70\,\mathrm{mm}$，试选取合适的变位系数。

解：1)计算啮合角α'

$\cos\alpha'=m\ (z_1+z_2)\ \cos\alpha/2a'=2.5\ (21+33)\ \cos 20°/2\times70=0.906\quad \alpha'=25°1'25''$

2)按$z_\Sigma=z_1+z_2=21+33=54$处垂直向上引线与$\alpha'=25°1'25''$相交于$c_1$点，由$c_1$点作水平线与纵坐标相交得，$x_\Sigma=1.125$

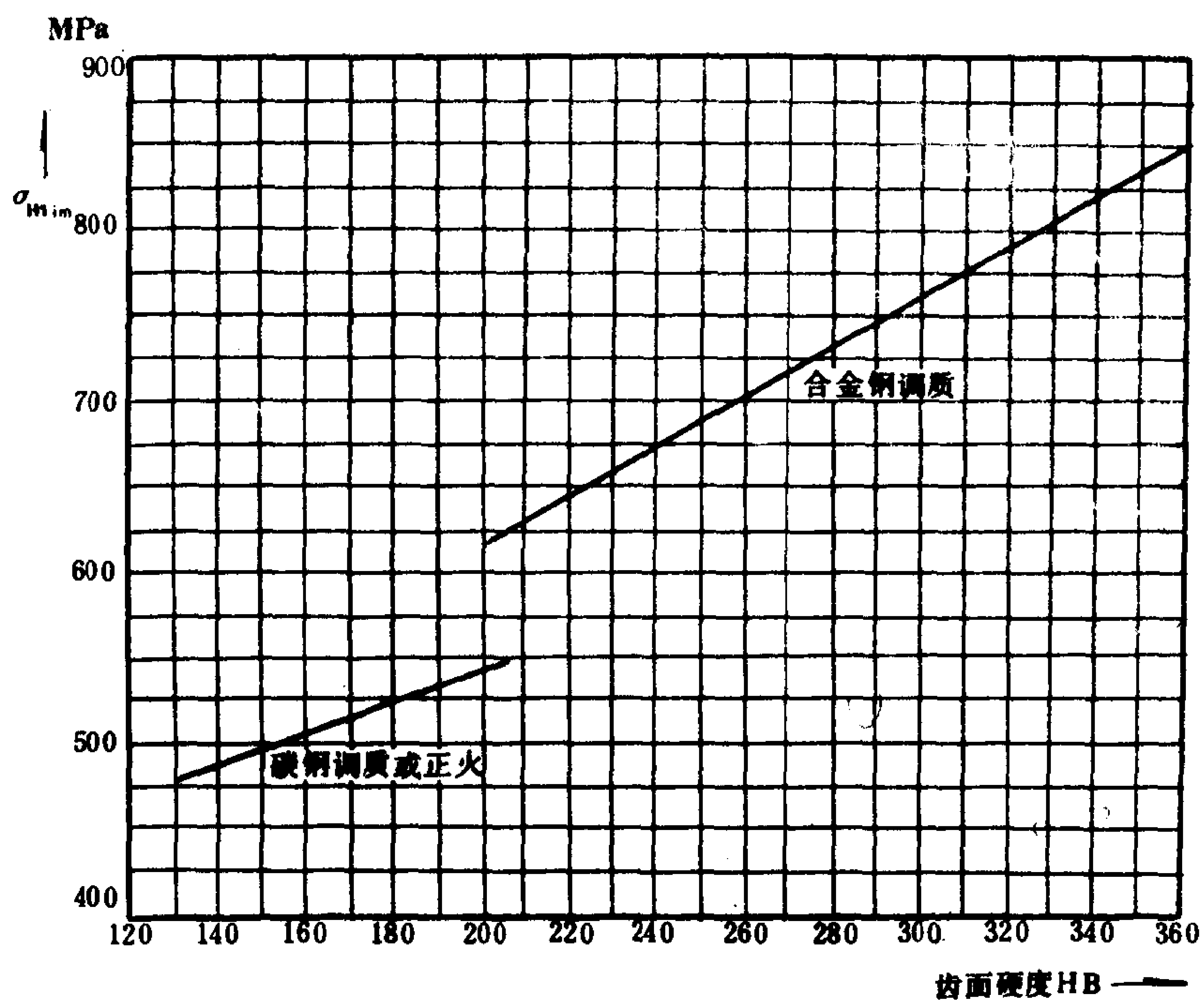


图 1.1.2-11　合金钢调质和碳钢调质或正火

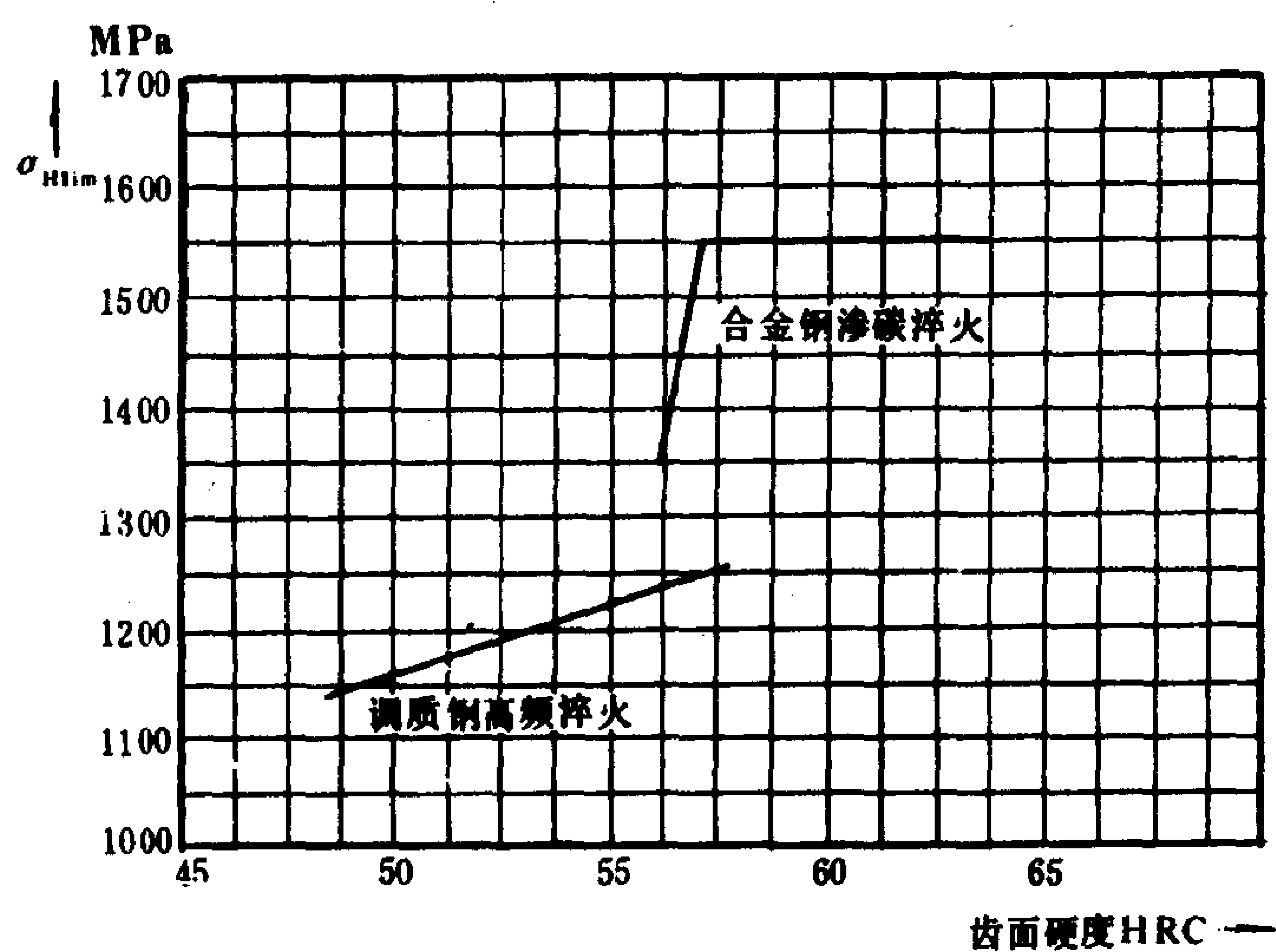


图 1.1.2-12　合金钢渗碳淬火和调质钢高频淬火

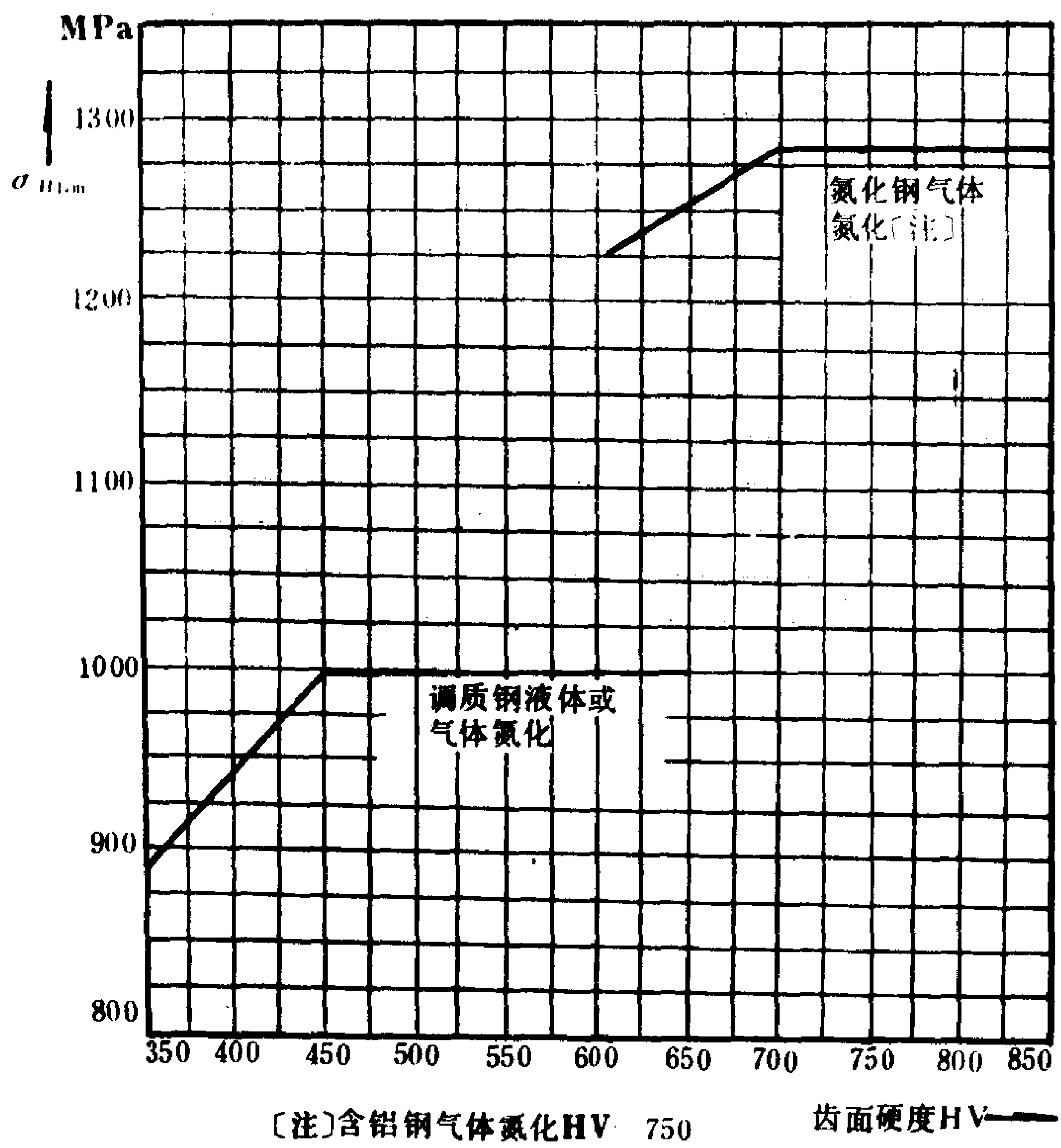


图 1.1.2-13 氮化钢气体氮化和调质钢液体或气体氮化

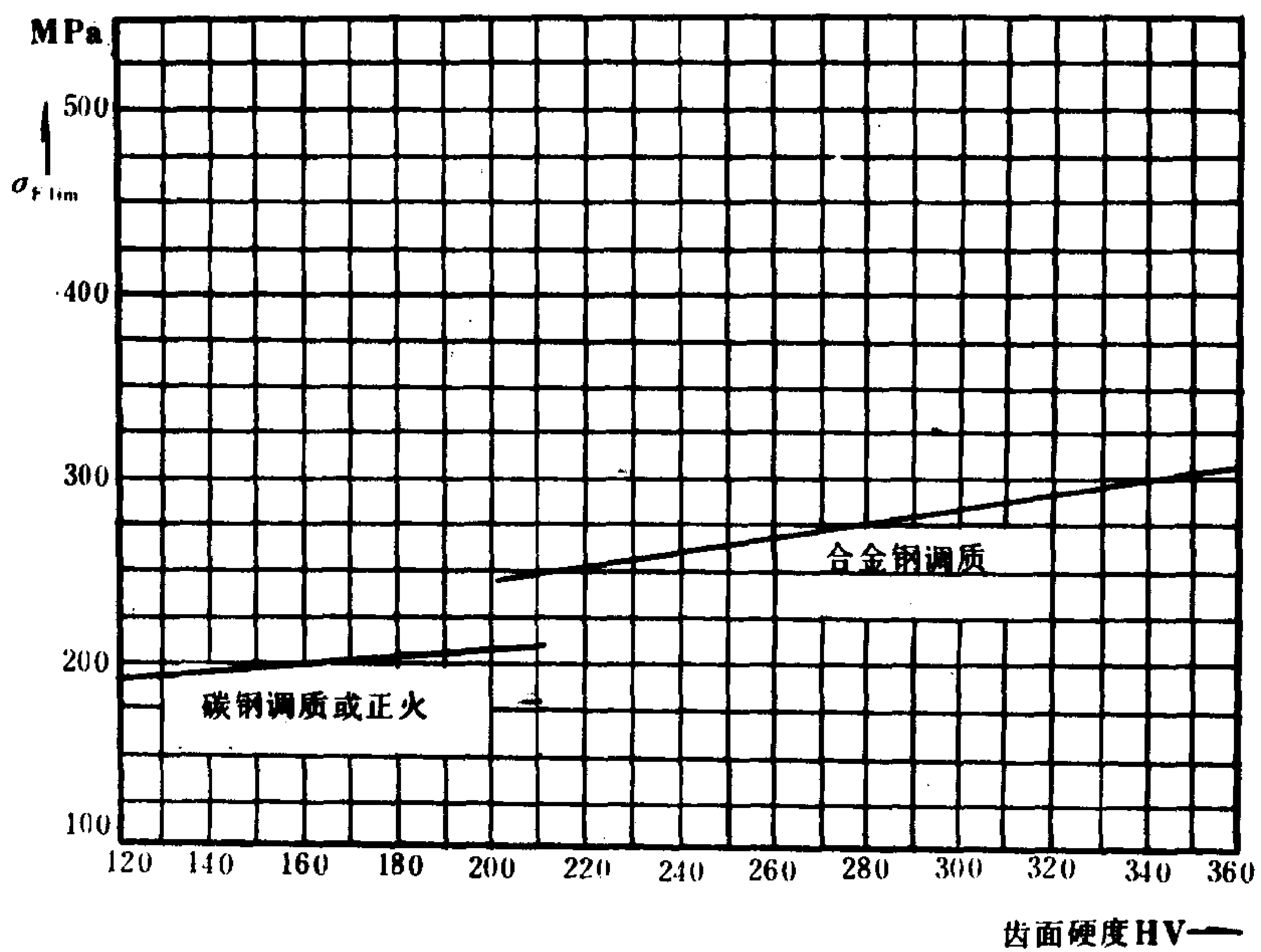


图 1.1.2-14 合金钢调质和碳钢调质或正火

3)因$u=z_2/z_1=1.57$，故按左边线图中的曲线 2 及x_Σ的水平线相交于A_1点，得$x_1=0.54$，$x_2=x_\Sigma-x_1=1.125-0.54=0.585$

例 2： 已知一外啮合直齿圆柱齿轮传动，其齿数$z_1=17$，$z_2=100$，要求尽可能提高齿面的接触强度，试确定其变位系数

解： 1)确定x_Σ

由于要尽可能地提高齿面的接触强度，就应按最大啮合角选取两轮变位系数之和x_Σ，由$z_\Sigma=z_1+z_2=17+100=117$处垂直向上引线，与阴影边界线交于$c_2$点（$c_2$点为$z_\Sigma=117$时的最大啮合角）$c_2$点的纵坐标为$x_\Sigma$，由图查得$x_\Sigma=2.54$

2)因$u=z_2/z_1=100/17=5.9$故按左线图中的曲线 5 及$x_\Sigma=2.54$的水平线相交于A_2点，得$x_1=0.77$，$x_2=x_\Sigma-x_1=2.54-0.77=1.77$

例 3： 两轮的齿数分别为$z_1=15$、$z_2=30$、压力角$\alpha=20°$，因小齿轮加工时要产生根切($z_1<z_{min}$)，中心距不能变动，试确定两轮的变位系数。

解： 因中心距不能变动，故采用高变位(零传动)，高变位传动时，其啮合角应等于其压力角（$\alpha'=\alpha=20°$），$x_\Sigma=x_1+x_2=0$，即$x_1=-x_2$。

齿数比$u=z_2/z_1=30/15=2$　由图 1.1.2-10 左方图的第三根曲线与$x_\Sigma=0$的水平线交点得$x_1=0.23$.故$x_2=-0.23$

3.1.6　变位圆柱齿轮机构的几何尺寸计算

变位直齿圆柱齿轮机构的几何尺寸计算见表 1.1.2-11；

外啮合变位斜齿圆柱齿轮机构的几何尺寸计算见表 1.1.2-12。

为了减小齿轮机构的尺寸而减少齿轮的齿数，同时使齿轮又不发生根切，有时为改进齿轮传动质量和凑中心距，生产上也常采用变位斜齿圆柱齿轮传动，上面所述的直齿圆柱齿轮的变位原理完全适用于变位斜齿圆柱齿轮，但选择斜齿圆柱齿轮变位系数时，可根据斜齿圆柱齿轮的当量齿数，利用直齿圆柱齿轮的确定变位系数的线图（图 1.1.2-10）来选择，这样选得的变位系数，是斜齿圆柱齿轮的法面变位系数x_n，斜齿圆柱齿轮的端面变位系数x_t可如下求得，$x_t=x_n\cos\beta$，当x_t求出后，则其余的变位计算均可按端面进行，其方法与直齿圆柱齿轮相同。

但是，如果为了凑中心距，斜齿圆柱齿轮也可以不必变位而只要改变斜齿圆柱齿轮的螺旋角β就可以了。因为斜齿圆柱齿轮的中心距$a=\dfrac{m_n(z_1+z_2)}{2\cos\beta}$，当$z_1$、$z_2$一定，$m_n$为标准值时，中心距$a$随螺旋角$\beta$而改变。因此可利用改变螺旋角的方法来达到凑中心距的目的。

表 1.1.2-11　　**变位直齿圆柱齿轮机构的几何尺寸计算公式**

序号	名称	符号	公式
已知条件：z_1、z_2、m、a'（实际中心距）			
1	模数	m	取标准值
2	分度圆直径	d	$d_1=mz_1$　$d_2=mz_2$
3	标准中心距	a	$a=\frac{1}{2}(d_2\pm d_1)=\frac{m}{2}(z_2\pm z_1)$
4	分度圆压力角	α	取标准值
5	啮合角	α'	$\cos\alpha'=\frac{a}{a'}\cos\alpha$

序　号	名　　称	符　号	公　　　　式
6	总变位系数	x_Σ	$x_\Sigma=\frac{z_2\pm z_1}{2\mathrm{tg}\alpha}(\mathrm{inv}\alpha'-\mathrm{inv}\alpha)$　　$x_\Sigma=x_2\pm x_1$
7	变位系数分配	x_1、x_2	根据使用条件决定、若外啮合传动、按图1.1.2-10得x_1、x_2
8	齿根圆直径	d_f	$d_{f1}=d_1-2(h_a^*+c^*-x_1)m$ $d_{f2}=d_2\mp2(h^*_a+c^*\mp x_2)m$
9	齿顶圆直径	d_a	$d_{a1}=\pm(2a'-d_{f2})-2c^*m=\pm(2a'-d_2)+2m(h_a^*-x_2)$ $d_{a2}=2a'\mp d_{f1}\mp2c^*m=2a'\mp d_1\pm2m(h_a^*-x_1)$
10	分度圆齿厚	s	$s_1=\left(\frac{\pi}{2}+2x_1\mathrm{tg}\alpha\right)m$　　$s_2=\left(\frac{\pi}{2}\pm2x_2\mathrm{tg}\alpha\right)m$
11	基圆直径	d_b	$d_{b1}=d_1\cos\alpha$　　$d_{b2}=d_2\cos\alpha$
12	齿顶圆压力角	α_a	$\alpha_{a1}=\cos^{-1}\frac{d_{b1}}{d_{a1}}$　　$\alpha_{a2}=\cos^{-1}\frac{d_{b2}}{d_{a2}}$
13	齿顶厚	s_a	$s_{a1}=s_1\frac{d_{a1}}{d_1}-d_{a1}(\mathrm{inv}\alpha_{a1}-\mathrm{inv}\alpha)$ $s_{a2}=s_2\frac{d_{a2}}{d_2}-d_{a2}(\mathrm{inv}\alpha_{a2}-\mathrm{inv}\alpha)$
14	重合度	ε	$\varepsilon=\frac{1}{2\pi}[z_1(\mathrm{tg}\alpha_{a1}-\mathrm{tg}\alpha')\pm z_2(\mathrm{tg}\alpha_{a2}-\mathrm{tg}\alpha')]$

注　上面符号用于外啮合，下面符号用于内啮合

例：已知：$z_1=21$、$z_2=33$、$a'=70$ mm、$m=2.5$、$\alpha=20°$、$h_a^*=1$、$c^*=0.25$　试设计外啮合齿轮传动

解：按序号次序计算：①$m=2.5$；②$d_1=2.5\times21=52.5$ mm　$d_2=2.5\times33=82.5$ mm；③$a=\frac{2.5}{2}(21+33)=67.5$ mm；④$\alpha=20°$；⑤$\cos\alpha'=\frac{67.5}{70}\cos20°=0.90613$　$\alpha'=25°1'27''$；⑥$x_\Sigma=\frac{21+33}{2\mathrm{tg}\,20°}(\mathrm{inv}\,25°1'27''-\mathrm{inv}\,20°)=1.1248$；⑦根据齿数$u=\frac{33}{21}=1.57$　由图1.1.2-10得$x_1=0.55$　$x_2=x_\Sigma-x_1=1.1248-0.55=0.5748$；⑧$d_{f1}=52.5-2(1+0.25-0.55)\times2.5=49$ mm $d_{f2}=82.5-2(1+0.25-0.5748)\times2.5=79.124$ mm；⑨$d_{a1}=(2\times70-79.124)-2\times0.25\times2.5=59.626$ mm，$d_{a2}=2\times70-49-2\times0.25\times2.5=89.75$ mm。

采用图1.1.2-10确定变位系数x_1、x_2，可保证齿顶厚s_a、及重合度$\varepsilon\geq1.2$，故不作验算。

表1.1.2-12　　**外啮合变位斜齿圆柱齿轮机构的几何尺寸计算**

序号	名　　称	符号	公　　　　式
已知条件：z_1、z_2、m_n、β、a'（实际中心距）			
1	螺旋角	β	$\beta_1=-\beta_2=\beta$
2	端面模数	m_t	$m_t=-m_n/\cos\beta$　$m_n=m$（取标准值）
3	端面分度圆压力角	α_t	$\mathrm{tg}\alpha_t=\mathrm{tg}\alpha_n/\cos\beta$　$\alpha_n=\alpha$（取标准值）
4	分度圆直径	d	$d_1=m_tz_1$　$d_2=m_tz_2$
5	标准中心距	a	$a=\frac{1}{2}(d_1+d_2)=\frac{m_t}{2}(z_1+z_2)$
6	端面啮合角	α'_t	$\cos\alpha'_t=\frac{a}{a'}\cos\alpha_t$
7	端面总变位系数	$x_{t\Sigma}$	$x_{t\Sigma}=\frac{z_1+z_2}{2\mathrm{tg}\alpha_t}$(① $\mathrm{inv}\alpha'_t-\mathrm{inv}\alpha_t$)　$x_{t\Sigma}=x_{t1}+x_{t2}$
8	法面总变位系数	$x_{n\Sigma}$	$x_{n\Sigma}=x_{t\Sigma}/\cos\beta$　$x_{n\Sigma}=x_{n1}+x_{n2}$

序号	名　称	符号	公　　式
9	当量齿数	z_v	$z_{v1}=\frac{z_1}{\cos^3\beta}$　$z_{v2}=\frac{z_2}{\cos^3\beta}$
10	端面变位系数的分配	x_{t1}、x_{t2}	根据使用条件，按当量齿数z_{v1}、z_{v2}及$x_{n\Sigma}$由图 1.1.2-10 分配得x_{n1}、x_{n2}再换算成x_{t1}、x_{t2} $x_{t1}=x_{n1}\cos\beta$　$x_{t2}=x_{n2}\cos\beta$
11	齿根圆直径	d_f	$d_{f1}=d_1-2\ (h_{at}^*+c_t^*-x_{t1})\ m_t$ $d_{f2}=d_2-2\ (h_{at}^*+c_t^*-x_{t2})\ m_t$
12	齿顶圆直径	d_a	$d_{a1}=2a'-d_{f2}-2c_t^*m_t=2a'-d_2+2m_t\ (h_{at}^*-x_{t2})$ $d_{a2}=2a'-d_{f1}-2c_t^*m_t=2a'-d_1+2m_t\ (h_{at}^*-x_{t1})$
13	基圆直径	d_b	$d_{b1}=d_1\cos\alpha_t$　$d_{b2}=d_2\cos\alpha_t$
14	端面齿顶压力角	α_{at}	$\cos\alpha_{at1}=\frac{d_{b1}}{d_{a1}}$　$\cos\alpha_{at2}=\frac{d_{b2}}{d_{a2}}$
15	重合度	ε	$\varepsilon=\frac{1}{2\pi}\ [z_1\ (\mathrm{tg}\alpha_{at1}-\mathrm{tg}\alpha'_t)\ +z_2\ (\mathrm{tg}\alpha_{at2}-\mathrm{tg}\alpha'_t)]$ ① $+$② $\frac{b\mathrm{tg}\beta}{\pi m_t}$

① $\mathrm{inv}\alpha'_t=\mathrm{tg}\alpha'_t-\alpha'_t$

② b为齿宽。

3.1.7 圆柱齿轮强度验算

按中华人民共和国船舶检验局“钢质海船入级与建造规范”(1986 年)规定，圆柱齿轮强度验算如表 1.1.2-13 所示。

表 1.1.2-13　　　　**圆柱齿轮强度验算**

齿面接触应力	
验算公式	$\sigma_H=Z_H\cdot Z_E\cdot Z_\varepsilon\cdot Z_\beta\sqrt{\frac{F_t}{d_1b}\cdot\frac{u\pm1}{u}}\sqrt{K_A\cdot K_V\cdot K_{H\beta}\cdot K_{H\alpha}}\leq\sigma_{HP}$
符号意义	σ_H——节圆上的接触应力，MPa Z_H——节点区域系数，$Z_H=\sqrt{\frac{2\cos\beta_b\cos\alpha_{tw}}{\cos^2\alpha_t\sin\alpha_{tw}}}$ β_b——基圆上的螺旋角，$\mathrm{tg}\beta_b=\mathrm{tg}\beta\cdot\cos\alpha_t$ α_{tw}——节圆上的端面压力角，$\cos\alpha_{tw}=\frac{Z_1+Z_2}{2a}\cdot\frac{m_n}{\cos\beta}\cos\alpha_t$ 其他符号及计算公式见表 1.1.2-8 Z_E——弹性系数，钢对钢的齿轮传动 $Z_E=189.8\sqrt{\mathrm{MPa}}$ Z_ε——重合度系数 当轴向重合度 $\varepsilon_\beta=\frac{b_c\sin\beta}{\pi m_n}\geq1$时　$Z_\varepsilon=\sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}}$ 当$\varepsilon_\beta<1$时　$Z_\varepsilon=\sqrt{\frac{4-\varepsilon_\alpha}{3}\ (1-\varepsilon_\beta)\ +\frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_\alpha}}$ b_c为有效齿宽，对于直齿和单斜齿$b_c=b$（工作齿宽），对于人字齿 $b_c=\frac{b}{2}$，mm ε_α为端面重合度，$\varepsilon_\alpha=\frac{\frac{1}{2}\left(\sqrt{d_{a1}^2-d_{b1}^2}\pm\sqrt{d_{a2}^2-d_{b2}^2}\right)\mp a\sin\alpha_{tw}}{\pi m_t\cos\alpha_t}$ 符号“±”和“∓”，上面的用于外啮合传动，下面的用于内啮合传动 其他符号及计算公式见表 1.1.2-8

齿面接触应力

符号意义

Z_β——螺旋角系数，$Z_\beta=\sqrt{\cos\beta}$

K_A——工况系数

原动机	原动机至齿轮箱的联轴器型式	K_A 值	
		主机	辅机
涡轮机 电动机	任意	1.15	1.0
柴油机	液力偶合器和电磁联轴器	1.15	1.0
	高弹性联轴器	1.25	1.1
	弹性联轴器	1.4	1.3
	刚性联轴器	1.6	1.5

K_V——动载系数，$K_V=1+3.5Q^2\cdot v\cdot Z_1(2+\sqrt{\varepsilon_\beta})^{-1}\cdot 10^{-5}$

Q为齿轮传动平稳性的精度等级，根据我国国家标准的有关规定，取小齿轮和大齿轮中的较大值。本公式仅用于$v\cdot Z_1\leq 1000$（直齿轮）或$v\cdot Z_1\leq 1400$（斜齿轮）。其他情况应经验船部门同意。

$K_{H\beta}$——接触应力齿向载荷分布系数，$K_{H\beta}=1+0.02Q'+\frac{(Q'^2-14)\ b_c}{10^5}+0.18\left(\frac{B}{d_1}\right)^2$

Q'为齿轮载荷分布均匀性的精度等级，根据我国国家标准规定，取小齿轮和大齿轮中的较大值。经螺旋线修形的齿轮，经验船部门同意，$K_{H\beta}$可另行考虑，B为总齿宽，对人字齿，乃为两边齿宽之和(包括空刀槽)

$K_{H\alpha}$——接触应力齿间载荷分配系数，$K_{H\alpha}=1+10\frac{b\cdot f_{pb}}{F_t\cdot K_A\cdot K_V\cdot K_{H\beta}}$

f_{pb}为基节偏差，μm，根据我国国家标准的有关规定，取小齿轮和大齿轮中较大值。当齿形误差f_f大于基节偏差f_{pb}时，则用f_f代替f_{pb}。如齿顶修缘，则f_{pb}（或f_f）取半值。当$K_{H\alpha}$的值大于$\frac{1}{Z_\varepsilon^2}$时，取$K_{H\alpha}=\frac{1}{Z_\varepsilon^2}$

F_t——小齿轮分度圆上的额定圆周力，N

u——齿数比，$u=Z_2/Z_1>1$

σ_{HP}——小齿轮和大齿轮的许用接触应力，MPa

$$\sigma_{HP}=\frac{\sigma_{Hlim}}{S_H}Z_N\cdot Z_L\cdot Z_R\cdot Z_V\cdot Z_W\cdot Z_X$$

σ_{Hlim}——接触疲劳极限应力，MPa。由图1.1.2-11至图1.1.2-13查取

Z_N——寿命系数，对于主机和重要用途的辅机$Z_N=1$

Z_L——润滑系数

$Z_L=0.68\nu_t+0.83$（适用于非表面硬化钢）

$Z_L=0.36\nu_t+0.9$（适用于表面硬化钢）

$\nu_t=\frac{1}{\left(1.2+\frac{80}{\nu_{50}}\right)^2}$　　ν_{50}为在50℃的运动粘度，mm^2/s

Z_R——粗糙度系数

$Z_R=\left(\frac{3}{R_{tm}}\right)^{0.08}$（适用于表面硬化钢）

$Z_R=\left(\frac{3}{R_{tm}}\right)^{0.15}$（适用于非表面硬化钢）

$R_{tm}=\frac{R_{t1}+R_{t2}}{2}\sqrt[3]{\frac{100}{a}}$　R_{t1}和R_{t2}是小齿轮和大齿轮跑合后的齿面峰谷平均粗糙度，μm

Z_V——速度系数

$Z_V=0.14v_p+0.93$（适用于表面硬化钢）

$Z_V=0.3v_p+0.85$（适用于非表面硬化钢）

$v_p=\frac{1}{\sqrt{0.8+\frac{32}{v}}}$　v为线速度，m/s

	齿面接触应力
符号意义	Z_W——工作硬化系数，仅适用于与表面硬化并磨齿的小齿轮相啮合的调质钢大齿轮 $Z_W=1.2-\frac{HB_2-130}{1700}$　HB_2为调质钢大齿轮的齿面硬度，且$130\leq HB_2\leq 400$ 其他情况$Z_W=1$ Z_X——尺寸系数，根据齿轮尺寸大小选用适当的钢材，以及采用合理的热处理时，$Z_X=1$ S_H——接触应力安全系数 单机$\begin{cases}主机S_H=1.25\\辅机S_H=1.2\end{cases}$　多机$\left(\begin{matrix}船舶装有多于一台独立\\主机和辅机的齿轮传动\end{matrix}\right)$$\begin{cases}主机S_H=1.2\\辅机S_H=1.15\end{cases}$

	齿根弯曲应力
验算公式	$\sigma_F=\frac{F_t}{bm_n}Y_{FS}\cdot Y_\varepsilon\cdot Y_\beta\cdot K_A\cdot K_V\cdot K_{F\beta}\cdot K_{F\alpha}\leq\sigma_{FP}$

	齿根弯曲应力
符号意义	σ_F——小齿轮和大齿轮的实际齿根弯曲应力，MPa Y_{FS}——综合齿形系数 外齿轮$Y_{FS}=c\ (Y_{Fa}\cdot Y_{Sa})$ $Y_{Fa}=2.03+\frac{17}{z_V}(1-x)^2$适用于变位系数$x\leq 0.6$ $Y_{Fa}=2.03+\frac{6.5}{x\cdot z_V}\ (0.512-0.8x^2)$ 适用于$x>0.6$ $Y_{Sa}=2.25^{(1+\frac{0.64x}{z_V^{0.23}})}-\frac{2.5}{z_V^{0.45}}$ 适用于$x\leq 0.8$ 对于符合基准齿形，即$\alpha_n=20^\circ$，$h=2.25m_n$，$\rho_f=0.25m_n$时　$c=c_1\cdot c_2\cdot c_3\cdot c_4=1$ 对于其他基准齿形 $c_1=$齿根圆角半径修正系数$=\left(\frac{0.25m_n}{\rho_f}\right)^{0.15(1+x)}$ $c_2=$齿高修正系数$=\left(\frac{h}{2.25m_n}\right)^{\frac{1}{(1+x)\ln z_v}}$ $c_3=$压力角修正系数$=\frac{0.5543}{(\sin\alpha_n)^{0.55}}$ $c_4=$凸台值修正系数$=1+P'$ $P'=$刀具凸台量P_{ro}（刀具齿顶圆角至齿面的垂直距离）与m_n之比值 内齿轮$Y_{FS}=c\cdot 5.9-2.8\ (2.25-h_2^*)$ $c=c_1\cdot c_2\cdot c_3\cdot c_4$（$c_3$用$z_V\to\infty$计算） $h_2^*=\frac{d_{a2}-d_{f2}}{2m_n}$ Y_ε——重合度系数，$Y_\varepsilon=0.25+\frac{0.75}{\varepsilon_\alpha}$ Y_β——螺旋角系数，$Y_\beta=1-\frac{\beta}{120^\circ}$（适用于$\varepsilon_\beta\geq 1$），$Y_\beta=1-\frac{\beta}{120^\circ}\varepsilon_\beta$（适用于$\varepsilon_\beta<1$） 当$\beta>30^\circ$时，取$\beta=30^\circ$代入计算 $K_{F\beta}$——弯曲应力的齿向载荷分布系数，取$K_{F\beta}=K_{H\beta}$ $K_{F\alpha}$——弯曲应力的齿间载荷分配系数，取$K_{F\alpha}=K_{H\alpha}$，当$K_{F\alpha}>\frac{1}{Y_\varepsilon}$时，取$K_{F\alpha}=\frac{1}{Y_\varepsilon}$ σ_{FP}——小齿轮和大齿轮的许用弯曲应力，MPa $\sigma_{FP}=\frac{\sigma_{Flim}}{S_F}Y_{ST}\cdot Y_N\cdot Y_\delta\cdot Y_R\cdot Y_X$

<table>
<tr><th colspan="2">齿 根 弯 曲 应 力</th></tr>
<tr><td>符
号
意
义</td><td>$\sigma_{F\lim}$——弯曲疲劳极限应力，MPa。由图 1.1.2-14 至图 1.1.2-16 查取。对于惰齿轮和行星齿轮$\sigma_{F\lim}$取查图所得值的 0.7 倍；对于两齿面承受全扭矩的齿轮（如装有固定螺距的侧推器等）$\sigma_{F\lim}$取查图所得值的 0.75 倍；对于齿圈和轮体采用套合装配的齿轮$\sigma_{F\lim}$取查图所得值的 0.8 倍
Y_{ST}——试验齿轮的应力修正系数，$Y_{ST}=2$
Y_N——寿命系数，对于主机和重要用途的辅机 $Y_N=1$
Y_δ——相对齿根圆角敏感系数
对于渗碳淬火和高频淬火钢 $Y_\delta=0.96+\frac{0.08}{\rho_f}$（当$\rho_f<1$ 时，取$\rho_f=1$）
对于氮化钢 $Y_\delta=0.8+\frac{0.3}{\sqrt{\rho_f}}$（当$\rho_f<1$ 时，取$\rho_f=1$）
对于非表面硬化钢 $Y_\delta=1+\frac{80-40\rho_f}{\sigma_s\cdot\rho_f}$（当材料屈服限$\sigma_S\geq300$ MPa有效，当$\rho_f<1$ 时，取$\rho_f=1$）
Y_R——相对表面状况系数
当齿根圆角的表面的峰谷平均粗糙度 $R_t\leq16\mu m$时，$Y_R=1$
其他情况 $Y_R=1.0-K\lg\left(\frac{R_t}{10}\right)$
$K=\frac{1}{10}$（适用于低碳钢和除氮化外的表面硬化钢）
$K=\frac{1}{6}$（适用于调质钢）
$K=\frac{1}{25}$（适用于氮化钢）
Y_X——尺寸系数
对于非表面硬化钢 $\begin{cases}Y_x=1.03-0.006m_n & (适用于 5<m_n<30)\\ Y_x=0.85 & (适用于 m_n\geq30)\end{cases}$
对于表面硬化钢 $\begin{cases}Y_x=1.05-0.01m_n & (适用于 5<m_n<30)\\ Y_x=0.75 & (适用于 m_n\geq30)\end{cases}$
对于所有材料，当$m_n\leq5$ 时，$Y_x=1$
S_F——弯曲应力安全系数
单机 $\begin{cases}主机 S_F=1.5\\ 辅机 S_F=1.36\end{cases}$ 多机 $\begin{cases}主机 S_F=1.36\\ 辅机 S_F=1.24\end{cases}$</td></tr>
</table>

3.1.8 蜗杆蜗轮传动以及圆柱蜗杆蜗轮机构的尺寸计算

蜗杆蜗轮传动用来传递相错轴间的动力和运动，蜗杆与蜗轮两轴的相错角通常$\Sigma=90°$，这种机构传动的优点：传动比大，工作平稳、无噪声、并且结构紧凑。缺点：因沿轮齿螺旋线方向有很大的滑动速度，故易发热和磨损，效率较低。

蜗杆蜗轮传动有圆柱蜗杆传动（图 1.1.2-17 a），单包围圆弧面蜗杆传动（图 1.1.2-17 b），双包围圆弧面蜗杆传动（图 1.1.2-17 c），及锥蜗杆传动（图 1.1.2-17 d）等。

1）普通圆柱蜗杆传动

普通圆柱蜗杆传动可分为渐开线蜗杆，护轴线蜗杆（或称延伸渐开线蜗杆）及阿基米德蜗杆，实际应用上大多数是阿基米德蜗杆。阿基米德蜗杆与其蜗轮啮合时，通过蜗杆轴线且垂直于蜗轮轴线的剖面称为主剖面，在主剖面内，蜗轮与蜗杆的啮合相当于渐开线齿轮与齿条的啮合。

2）圆柱蜗杆蜗轮传动的主要参数

表 1.1.2-14 中心距a的推荐系列

第一系列	50	63	80	100	125	160	200	250	320	400	500
第二系列	90	112	140	180	224	280	360	450			

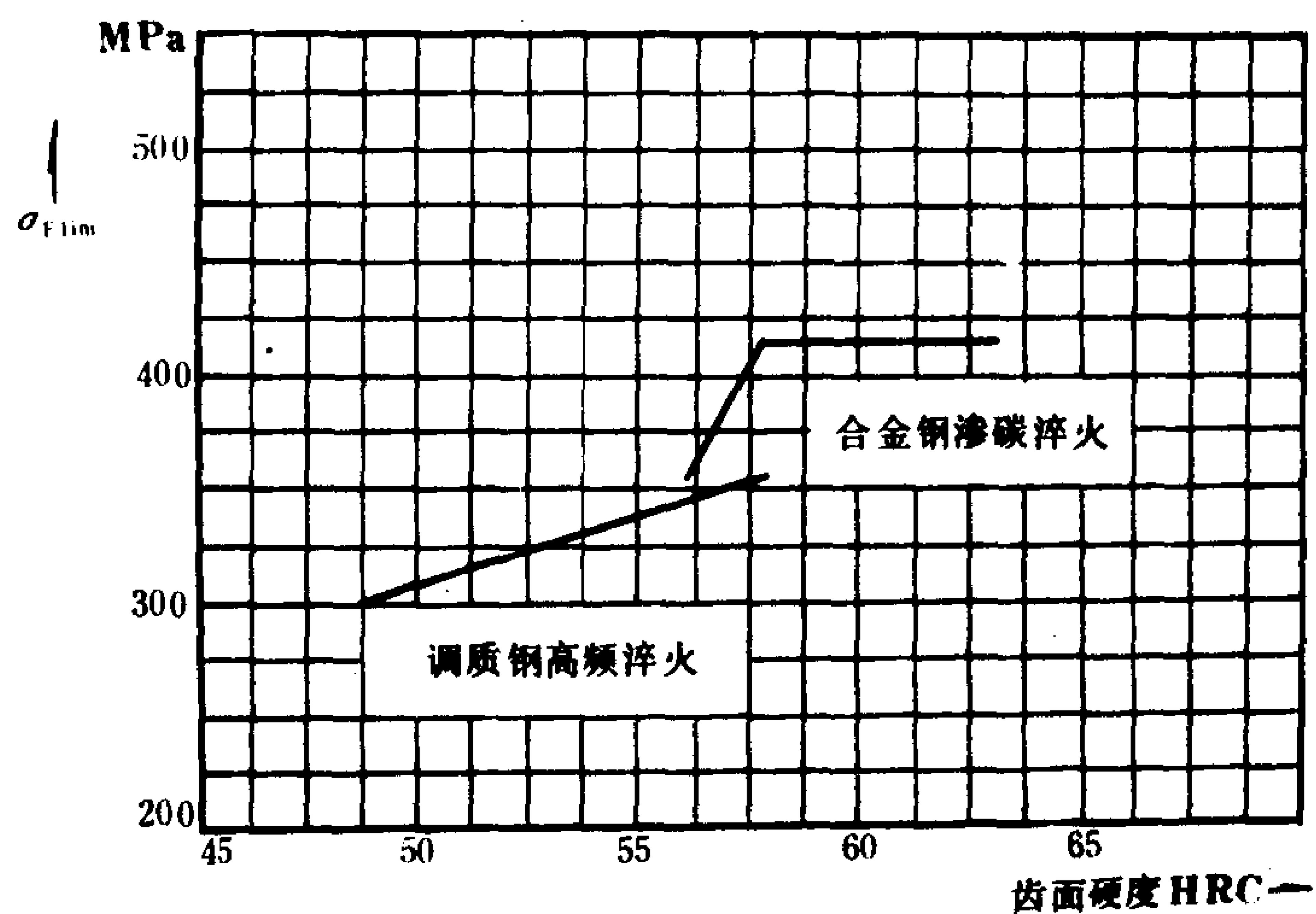


图 1.1.2-15　合金钢渗碳淬火和调质钢高频淬火

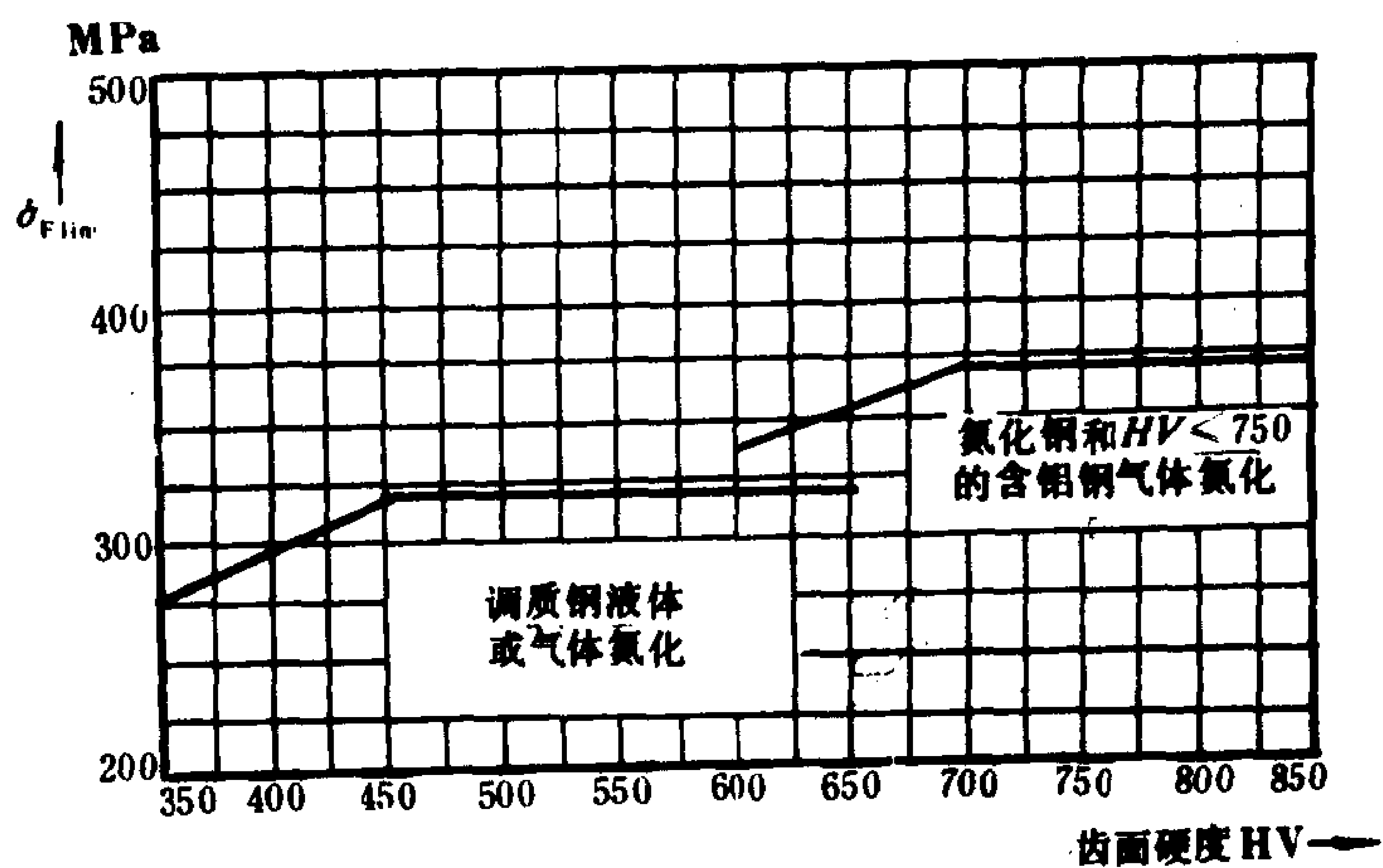


图 1.1.2-16　氮化钢气体氮化和调质钢液体或气体氮化

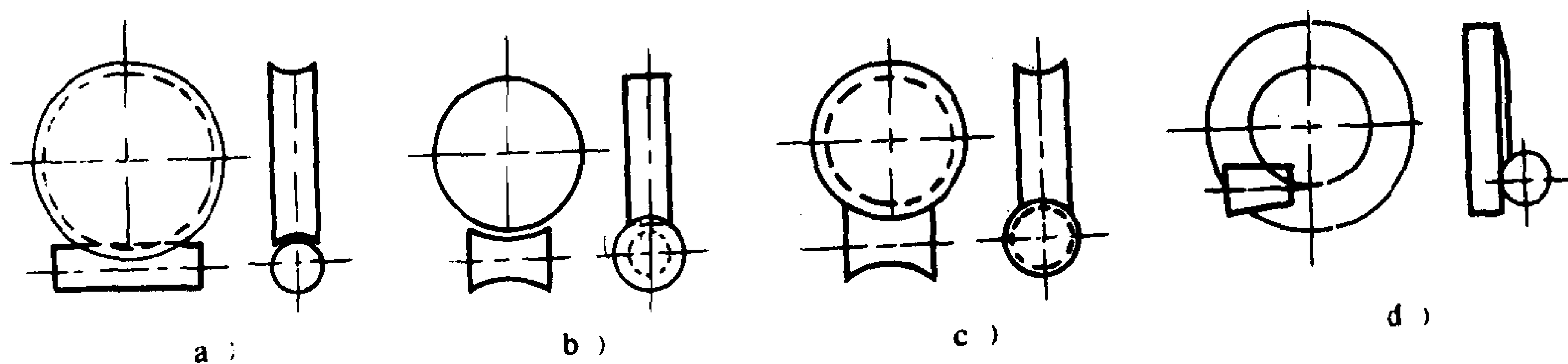


图 1.1.2-17　蜗杆蜗轮传动的主要类型

表 1.1.2-15　　传动比i的系列

第一系列	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
第二系列	9	11.2	14	18	22.4	28	35.5	45	

模数　蜗轮的端面模数m_t等于蜗杆的轴向模数m_a，并参照表 1.1.2-16 选用标准值

表 1.1.2-16　　模数m_t和蜗杆特性系数q的对应值（JZ 64-60）

m_t (mm)	1	1.5	2	2.5	3	(3.5)	4	(4.5)	5	6
q	14	14	13	12	12	12	11	11	10(12)	9(11)
m_t (mm)	(7)	8	(9)	10	12	14	16	18	20	25
q	9(11)	8(11)	8(11)	8(11)	8(11)	9	9	8	8	8

注　1. 括号内的模数尽可能不用；

2. 带括号的q值用于套在轴上的齿圈，需要提高蜗杆的刚度或蜗轮齿数较多的场合。

若以λ表示蜗杆分度圆柱上螺旋线的升角，则可将蜗杆头数Z_1及λ、q的关系列于下表

表 1.1.2-17　　λ、z_1、q值的关系（JZ 64-60）

蜗杆头数	蜗杆特性系数q值					
z_1	13	12	11	10	9	8
升角	λ					
1	4°23′55″	4°45′49″	5°11′40″	5°42′38″	6°20′25″	7°07′30″
2	8°44′46″	9°27′44″	10°18′17″	11°18′36″	12°31′44″	14°02′10″
3	12°59′41″	10°02′10″	15°15′18″	16°41′57″	18°26′06″	20°33′32″
4	17°06′10″	18°26′06″	19°58′59″	21°48′05″	23°57′45″	26°32′54″

3）变位蜗杆蜗轮

蜗杆蜗轮的变位方法也是切削时把刀具移位。由于蜗杆相当于齿条或滚刀，所以蜗杆不变位，尺寸保持不变，仅蜗轮变位、又因为在主剖面内蜗轮蜗杆的啮合，相当于齿轮和齿条的啮合，而无论齿条靠近还是远离齿轮中心，其啮合角永为分度圆上的压力角，即$\alpha'=\alpha$，这表明蜗轮的节圆与分度圆总是重合、即$d'_2=d_2$

图 1.1.2-18 b)，表示一对标准蜗杆蜗轮，这时蜗轮的节圆直径$d'_2=d_2$（蜗轮分度圆直径），蜗杆的节圆直径$d'_1=d_1$（蜗杆分度圆直径），实际中心距$a'=a$（标准中心距）

图 1.1.2-18 a)，表示一对负传动的蜗杆蜗轮，这时$d'_2=d_2$、$d'_1<d_1$、$a'<a$，而蜗轮的

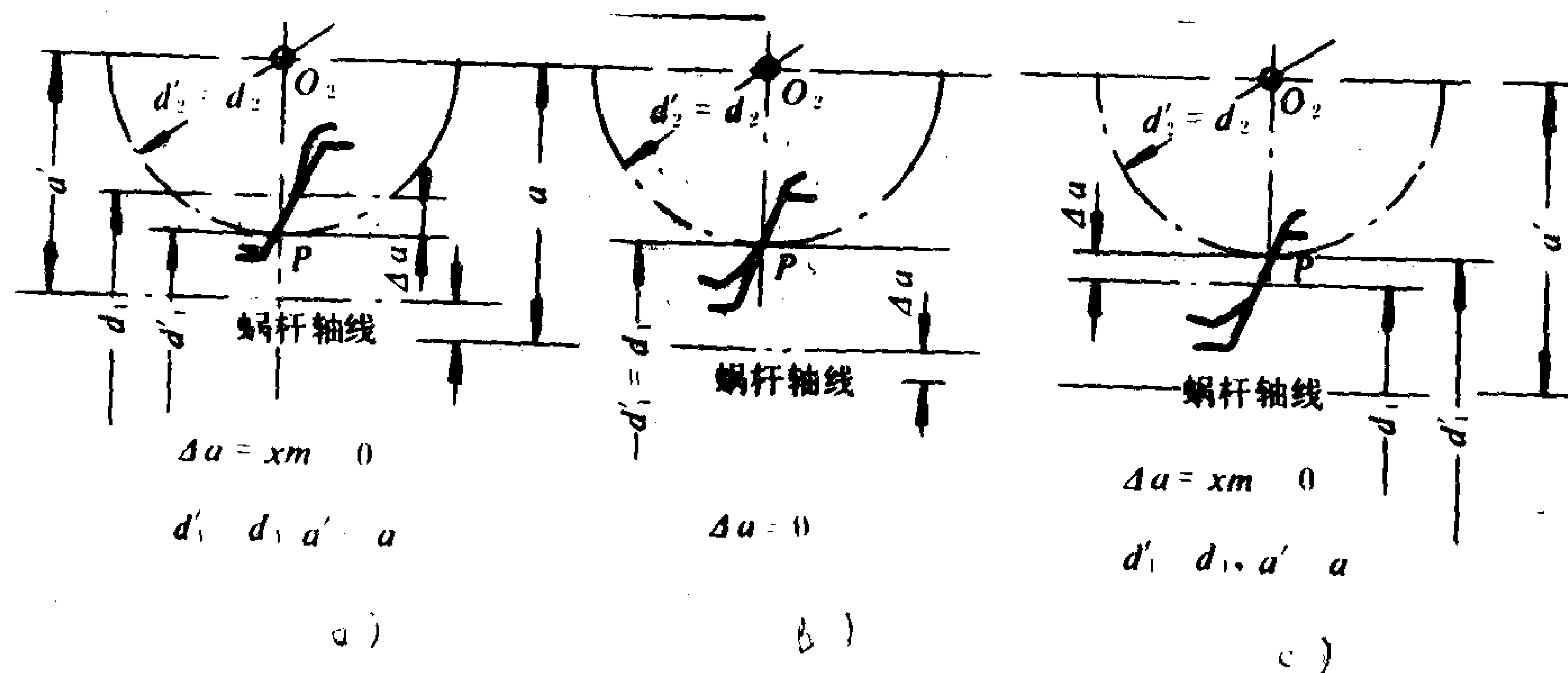
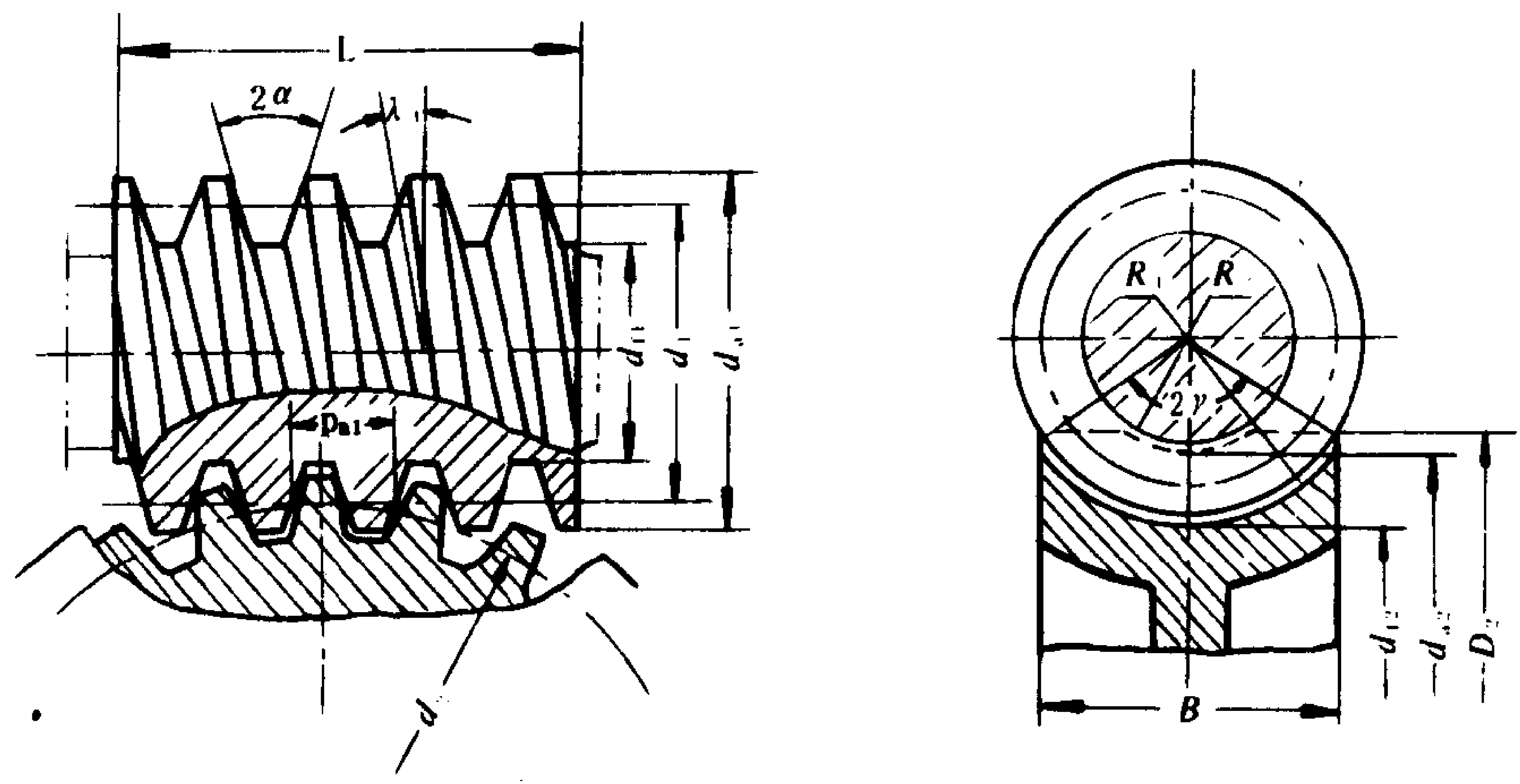


图 1.1.2-18　蜗杆蜗轮传动的变位

变位系数x为负值。图 1.1.2-18 c)，表示正传动的蜗杆蜗轮，此时，$d'_2=d_2$，$d'_1>d_1$，$a'>a$，而蜗轮的变位系数x为正值。

4)圆柱蜗杆蜗轮机构的几何尺寸计算，见表 1.1.2-18。

表 1.1.2-18　　**圆柱蜗杆蜗轮机构的几何尺寸计算公式**



序号	名　称	符号	公式：蜗　杆	公式：蜗　轮
1	模数	m	$m=m_{a1}=m_{t2}$　由强度计算或结构要求，按表 1.1.2-16 取标准值	
2	齿数	z	z_1（头数）$=1\sim4$	$z_2=iz_1$
3	传动比	i	$i=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{n_1}{n_2}=\frac{z_2}{z_1}$	
4	蜗杆特性系数	q	$q=d_1/m$	
5	蜗杆轴向周节	p_{a1}	$p_{a1}=\pi m$	
6	蜗杆螺旋线导程	p_z	$p_z=z_1p_{a1}$	
7	蜗杆轴面压力角	α	$\alpha=20^\circ$（阿基米德蜗杆）	轴截面圆弧齿蜗杆$\alpha=23^\circ$
8	径向间隙	c	$c=c^*m$　$c^*=(0.2\sim0.3)\ m$	
9	齿顶高	h_a	$h_{a1}=h_a^*m$　$h_a^*=1$	$h_{a2}=(h_a^*+x)\ m$
10	齿根高	h_f	$h_{f1}=(h_a^*+c^*)\ m$	$h_{f2}=(h_a^*+c^*-x)\ m$
11	全齿高	h	$h_1=h_2=(2h_a^*+c^*)\ m$	
12	分度圆直径	d	$d_1=mq$	$d_2=mz_2$
13	齿顶圆直径	d_a	$d_{a1}=d_1+2h_{a1}$	$d_{a2}=d_2+2h_{a2}$
14	齿根圆直径	d_f	$d_{f1}=d_1-2h_{f1}$	$d_{f2}=d_2-2h_{f2}$
15	节圆直径	d'	$d_1'=m\ (q+2x)$	$d'_2=d_2=mz_2$
16	中心距	a'	$a'=\frac{m}{2}\ (q+z_2+2x)$	
17	蜗杆升角	λ_1	$\mathrm{tg}\lambda_1=z_1/q$	
18	蜗轮螺旋角	β_2		$\beta_2=\lambda_1$
19	蜗杆螺纹长度	L①	当$z_1=1$、2 时　$L=(12+0.1z_2)\ m$ 当$z_1=3$、4 时　$L=(13+0.1z_2)\ m$	

序号	名　称	符号	公式	
			蜗　杆	蜗　轮
20	蜗轮宽度	B		当$z_1=1\sim3$时　$B\leq0.75d_{a1}$ 当$z_1=4$时　$B\leq0.67d_{a1}$
21	包角	2γ		$\sin\gamma\approx\frac{B}{d_{a1}-0.5m}$
22	齿根圆弧半径	R_1		$R_1=\frac{d_{a1}}{2}+c$
23	齿顶圆弧半径	R_2		$R_2=\frac{d_{f1}}{2}+c$

① 磨削蜗杆需加长：$m\leq10$时，加长25 mm；$10<m<16$时，加长35 mm；$m>16$时，加长40～50 mm。

3.1.9 圆锥齿轮机构以及直齿圆锥齿轮的几何尺寸计算

圆锥齿轮机构是用来传递两相交轴之间的动力和回转运动，其轮齿是分布在一个截锥体的锥面上（如图1.1.2-19）其齿形从大端到小端逐渐缩小，若一对圆锥齿轮的运动与一对摩擦圆锥相同，则该摩擦圆锥就相当于圆锥齿轮的节圆锥。与圆柱齿轮相似，圆锥齿轮也有分度圆锥，齿顶圆锥，齿根圆锥和基圆锥。

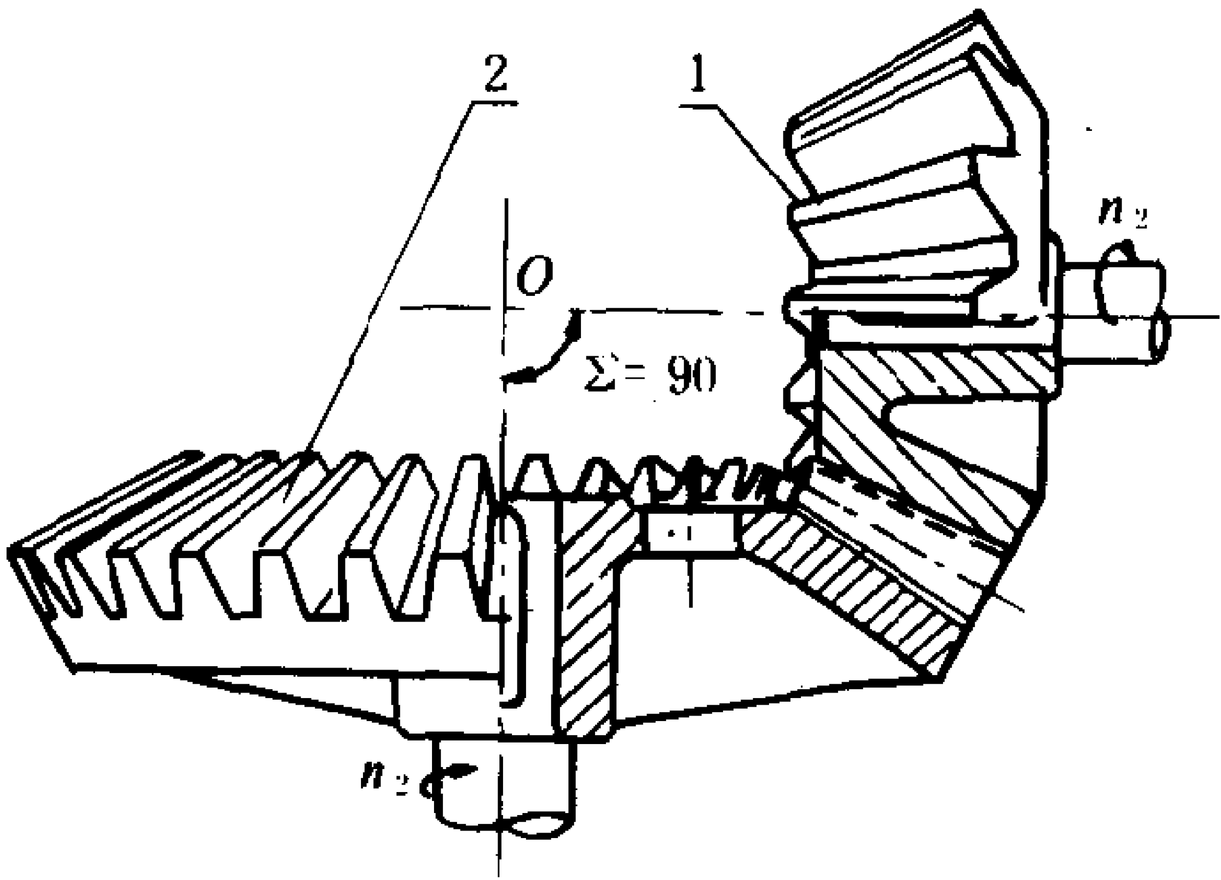


图1.1.2-19　直齿圆锥齿轮传动

一对圆锥齿轮两轴之间的交角Σ可根据传动的需要来决定。在一般机械中多采用$\Sigma=90°$的传动；而在某些机械中也常采用$\Sigma\neq90°$的圆锥齿轮传动。

按两轮啮合的形式不同，圆锥齿轮可分为；外啮合、内啮合和平面啮合三种（图1.1.2-20）

圆锥齿轮的轮齿，有直齿、斜齿（图1.1.2-21 a）及曲齿（圆弧齿，图1.1.2-21 b，延长外摆线齿线，图1.1.2-21 c）等多种形式。由于直齿圆锥齿轮的设计、制造和安装均较方便，故应用较广。曲齿圆锥齿轮因传动平稳，承载能力较高，常用于高速重载的传动，如汽

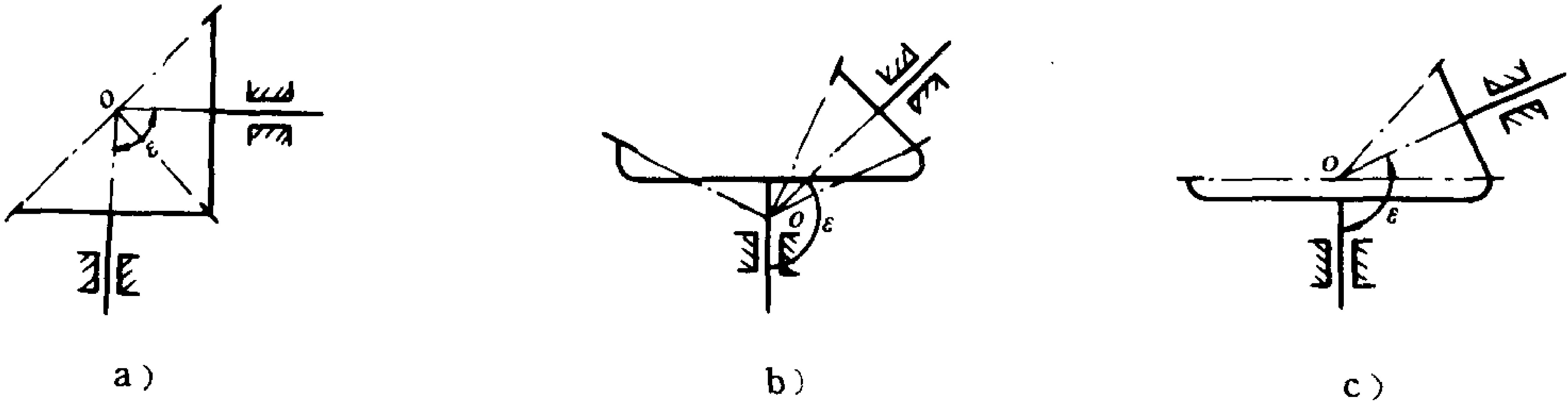


图1.1.2-20　不同啮合形式的圆锥齿轮传动

a）外啮合；b）内啮合；c）平面啮合

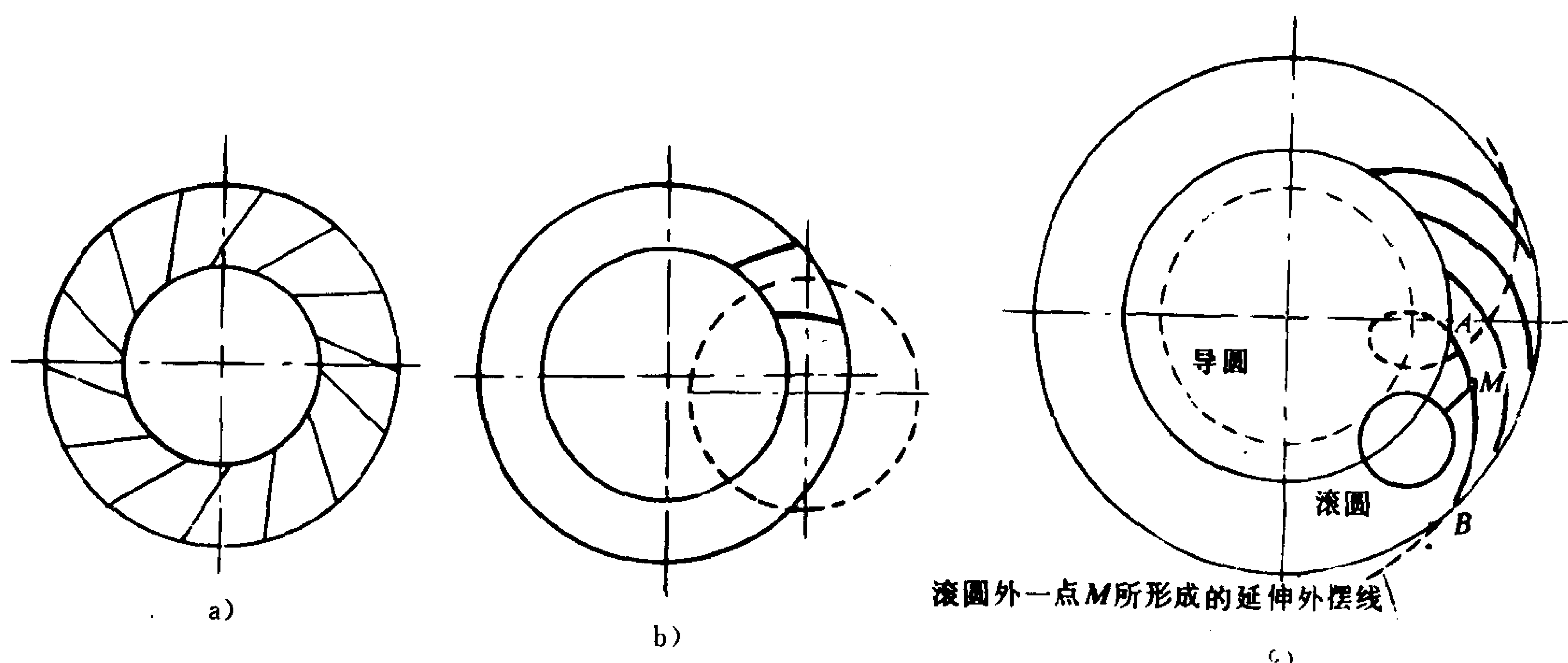


图 1.1.2-21 圆锥齿轮的轮齿形式

a) 斜齿锥齿轮；b) 圆弧锥齿轮；c) 延长外摆线锥齿轮

车、拖拉机中的差速齿轮等。

1)当量圆柱齿轮及当量齿数

由于圆锥齿轮的齿廓曲线是球面曲线，但是球面不能展开成平面，因此，可以近似地用背锥上的齿形来代替球面上的齿形，因为背锥可以展开成平面，这样，就便于设计和制造圆锥齿轮了。

图 1.1.2-22 为一对圆锥齿轮的轴向剖面图，AOP，及BOP分别为两轮的分度圆锥，AO_1P和BO_2P分别为两轮的背锥，δ_1，δ_2为两轮的分度圆锥角，将两背锥展开成平面后，可得到两个扇形齿轮。该扇形齿轮的模数、压力角、齿顶高、齿根高及齿数z_1、z_2就是圆锥齿轮的模数，压力角、齿顶高、齿根高及齿数z_1、z_2。又扇形齿轮的分度圆半径r_{v1}和r_{v2}，即为背锥的锥距。将两扇形齿轮的轮齿补足后，使其成为完整的圆柱齿轮，这补足轮齿的两个圆柱齿轮，称为该两圆锥齿轮的当量圆柱齿轮。当量圆柱齿轮上全圆周上具有的齿数称为当量齿数。当量齿数z_v总大于真实齿数z，且常不为整数。z_v与z的关系式如下：

对于直齿圆锥齿轮及零度锥齿轮

$$z_v=\frac{z}{\cos\delta} \qquad (1.1.2\text{-}13)$$

对于斜齿和曲齿锥齿轮

$$z_v=\frac{z}{\cos^3\beta_m\cos\delta} \qquad (1.1.2\text{-}14)$$

式中，δ为分度圆锥角，β_m为中点螺旋角。

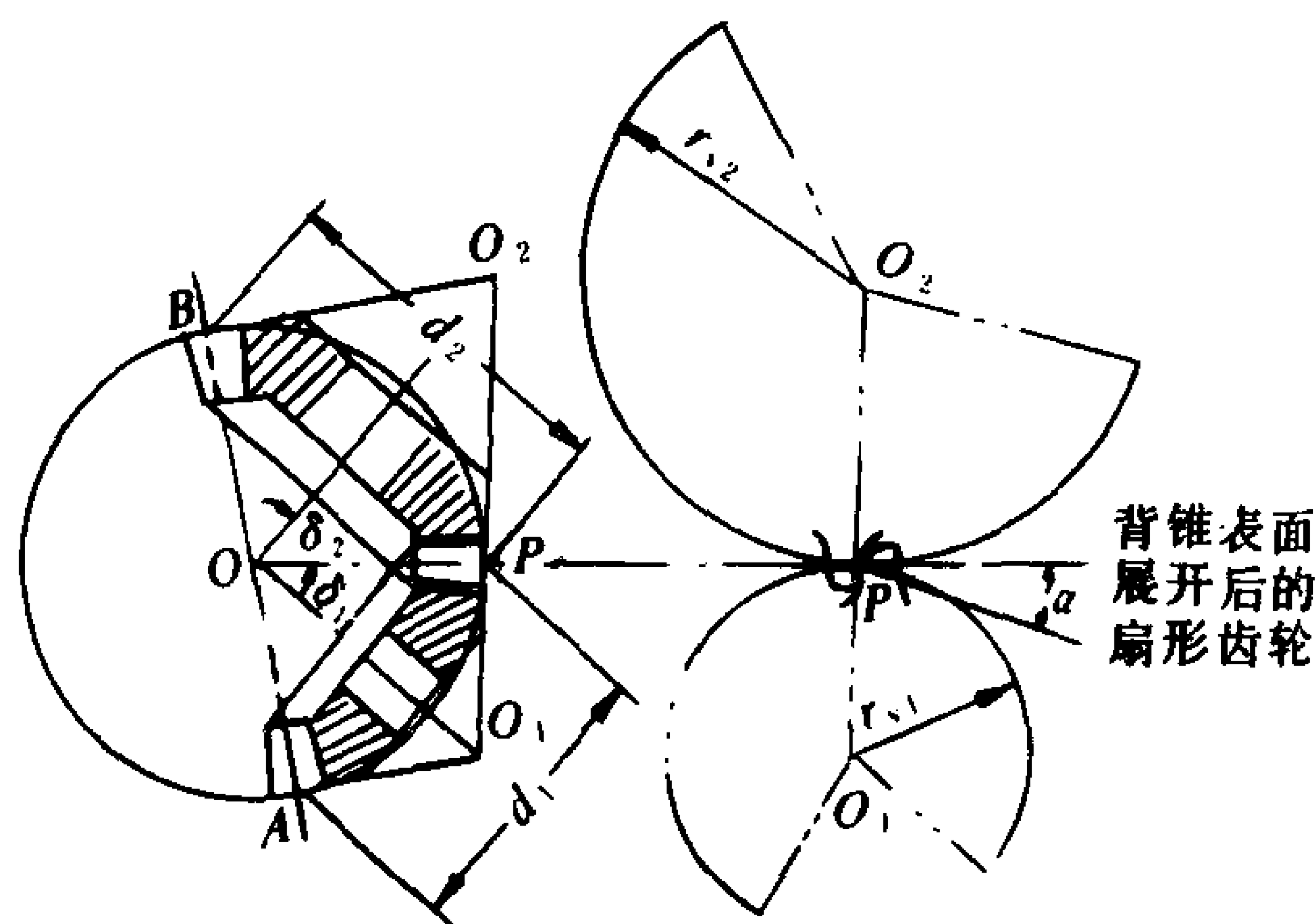


图 1.1.2-22 圆锥齿轮的当量圆柱齿轮

圆锥齿轮不发生根切的最少齿数z_{min}，亦可根据当量圆柱齿轮不根切的最少齿数z_{vmin}来决定，用压力角$\alpha=20°$，齿根高系数$h_a^*=1$的齿条型刀具加工时，$z_{vmin}=17$，容许少量根切时，$z_{vmin}=14$。因此，对于直齿圆锥齿轮，其不发生根切的最少齿数$z_{min}=z_{vmin}\cos\delta=17\cos\delta$。

2)正常收缩齿和等间隙收缩齿

直齿圆锥齿轮的齿顶圆锥，齿根圆锥和分度圆锥具有同一个锥顶点O（表 1.1.2-20 中图a)，所以一对圆锥齿轮轮齿之间的齿顶间隙由大端至小端逐渐缩小，这种齿轮称为正常收缩齿齿轮。

等间隙收缩齿（表 1.1.2-20 中图b）它是从大端到小端齿顶间隙不变，均为大端的齿顶间隙，亦即一个圆锥齿轮的齿顶母线平行于另一个圆锥齿轮的齿底母线，齿顶圆锥的顶点O'和O''便落在分度圆锥顶点O之内。

3)直齿圆锥齿轮的变位修正

变位圆锥齿轮大多采用高变位和切向变位，高变位的目的是为了避免小齿轮的根切，提高小齿轮的轮齿强度，改善圆锥齿轮的传动质量。齿轮经高变位后，齿顶高和齿根高不再和规定的标准基准齿形相符。采用高变位时，小齿轮采用正变位，大齿轮采用负变位，即取$x_1=-x_2$。在这种情况下，分度圆锥与节圆锥重合，啮合角等于分度圆压力角，轴角$\sum$不变，但齿顶圆锥角和齿根圆锥角改变了。

圆锥齿轮的高变位的计算是按其当量圆柱齿轮的高变位方法进行的，因此一对高变位的圆锥齿轮，其两轮的当量齿数必须满足如下条件：

$$z_{v1}+z_{v2}\geq 2z_{vmin} \tag{1.1.2-15}$$

圆锥齿轮不产生根切的最小变位系数为

$$x_{min}\geq h_a^*\frac{z_{vmin}-z_v}{z_{vmin}} \tag{1.1.2-16}$$

式中：　z_{v1}、z_{v2}——两圆锥齿轮的当量齿数；

z_{vmin}——当量圆柱齿轮的最小齿数。

圆锥齿轮的切向变位是采用改变两轮分度圆齿厚的方法使一对互相啮合的轮齿强度趋于相等，即使小齿轮齿厚增加$\Delta s_1=x_{t1}m$，大齿轮齿厚减少$\Delta s_2=x_{t2}m=-x_{t1}m$，亦即$x_{t1}=$

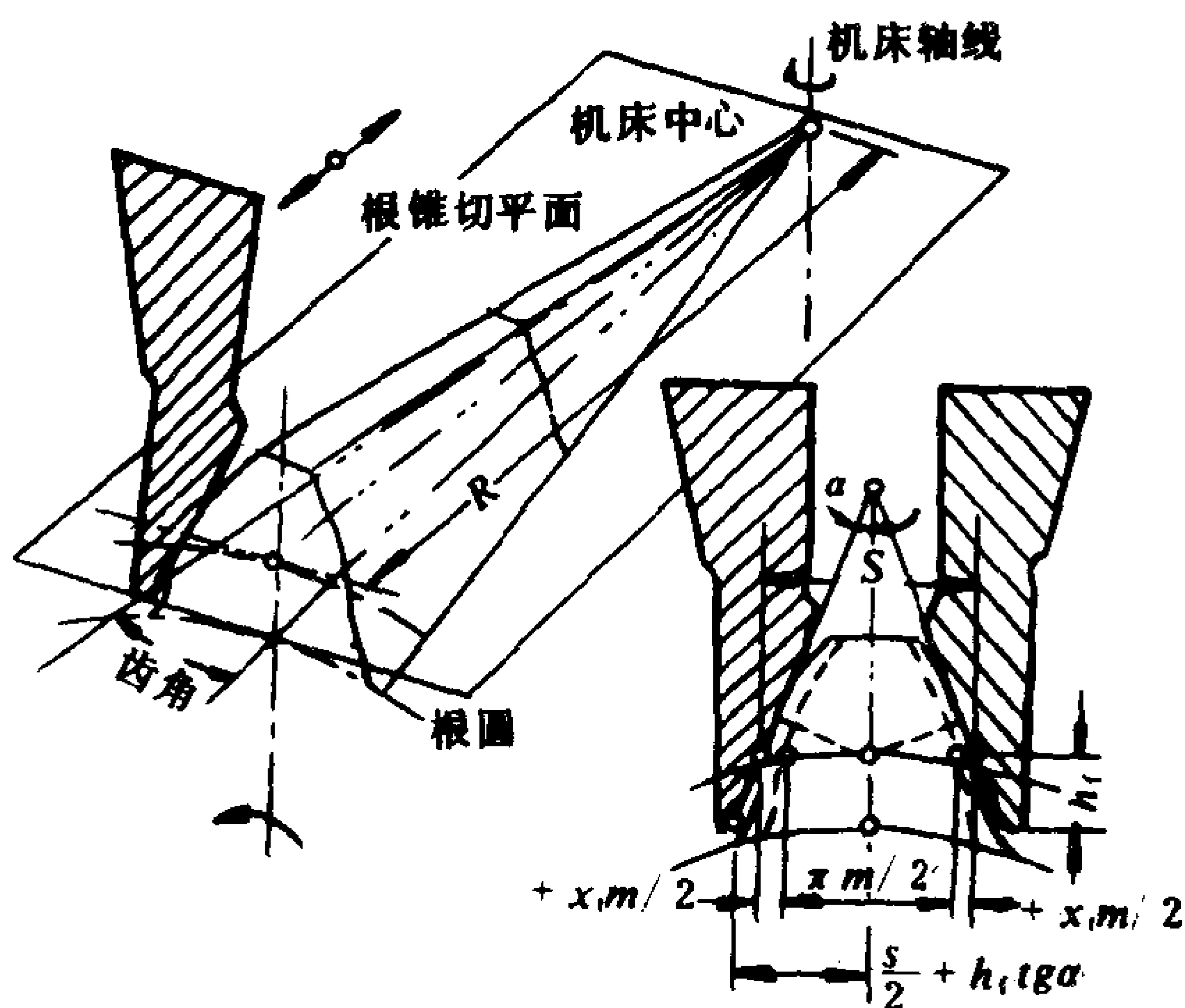


图 1.1.2-23　直齿圆锥齿轮切向变位

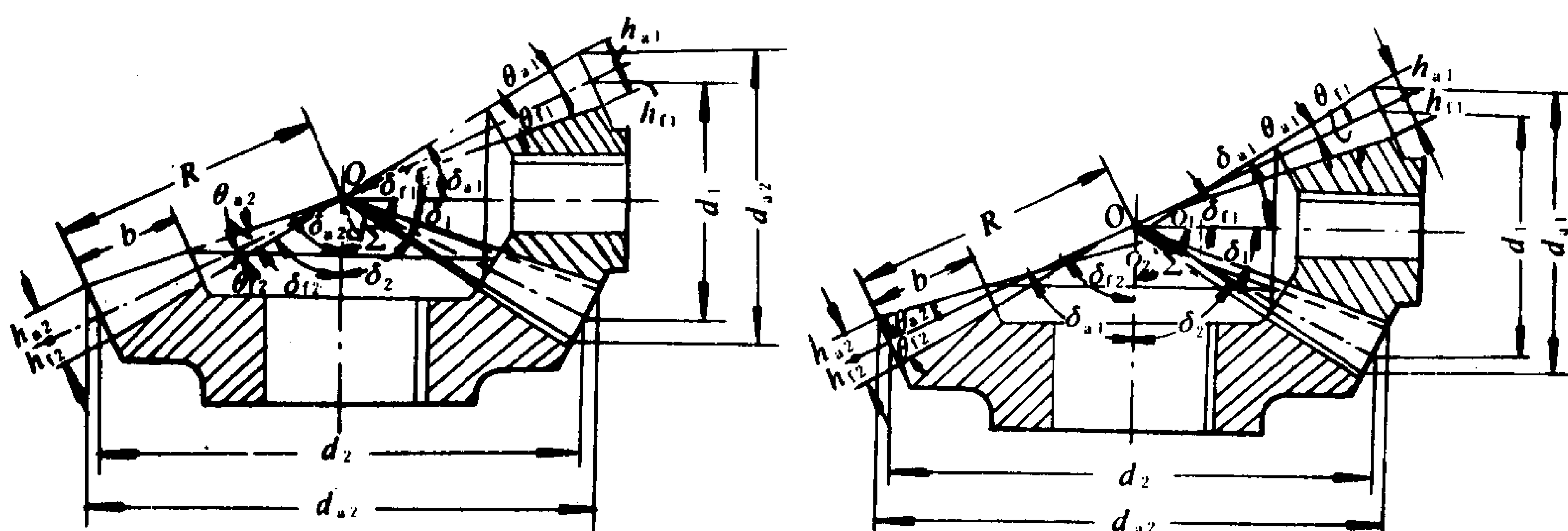
$-x_{t2}$，其中x_t为切向变位系数，完成切向变位的加工方法是加工时将两个刀片各沿分度圆的切线方向靠拢或分离$\frac{x_t m}{2}$的距离（图 1.1.2-23)。切向变位后，仅改变轮齿的齿厚；其它尺寸和参数不变。

同时进行高度变位和切向变位的圆锥齿轮，其分度圆齿厚为

$$s=m\left(\frac{\pi}{2}+2x\text{tg}\alpha+x_t\right) \tag{1.1.2-17}$$

4)直齿圆锥齿轮机构的几何尺寸计算　见表 1.1.2-19。

表 1.1.2-19　直齿圆锥齿轮机构的几何尺寸计算(适用于标准齿轮及高度变位和切向变位传动)



a）正常收缩齿　　　　b）等间隙收缩齿

序号	名　称	代号	计算公式和选用说明
1	模数	m	以大端模数作为标准，由强度计算或结构需要而定，并按表 1.1.2-7 选用标准值
2	传动比	i	$i_{12}=\frac{n_1}{n_2}$　n_1，n_2为轮 1 和轮 2 的转数r/min
3	齿数	z	z_1不根切时的最少齿数$z_{1min}\approx 13$　通常$z_1=10\sim 40$　$z_2=i_{12}z_1$
4	轴角	Σ	$\Sigma=90°$　及$\Sigma\neq 90°$　绝大部分为$\Sigma=90°$传动
5	分度圆锥角	δ	当$\Sigma=90°$时；$\delta_1=\text{ctg}^{-1}i_{12}$，$\delta_2=\Sigma-\delta_1$ 当$\Sigma\neq 90°$时；$\delta_1=\text{ctg}^{-1}\left(\frac{i_{12}+\cos\Sigma}{\sin\Sigma}\right)$　$\delta_2=\Sigma-\delta_1$
6	分度圆直径	d	$d_1=mz_1$　　$d_2=mz_2$
7	锥距	R	$R=d_1/2\sin\delta_1$，当$\Sigma=90°$时；$R=d_1/2\sin\delta_1=\frac{m}{2}\sqrt{z_1^2+z_2^2}$
8	齿宽	b	$b\leq\frac{1}{3}R$
9	齿顶高	h_a	$h_{a1}=m(h_a^*+x_1)$　　$h_{a2}=m(h_a^*+x_2)=m(h_a^*-x_1)$ 若标准齿轮，变位系数$x_1=x_2=0$，若高度变位传动，则x_1，x_2数值可参阅②
10	齿根高	h_f	$h_{f1}=m(h_a^*+c^*-x_1)$　　$h_{f2}=m(h_a^*+c^*-x_2)$ 标准齿$h_a^*=1$　$c^*=0.2$，短齿$h_a^*=0.8$，$c^*=0.3$（短齿在特殊情况下应用）
11	齿顶角	θ_a	$\theta_{a1}=\text{tg}^{-1}\frac{h_{a1}}{R}$　　$\theta_{a2}=\text{tg}^{-1}\frac{h_{a2}}{R}$
12	齿根角	θ_f	$\theta_{f1}=\text{tg}^{-1}\frac{h_{f1}}{R}$　　$\theta_{f2}=\text{tg}^{-1}\frac{h_{f2}}{R}$
13	齿顶圆锥角	δ_a	正常收缩齿：$\delta_{a1}=\delta_1+\theta_{a1}$　$\delta_{a2}=\delta_2+\theta_{a2}$ 等间隙收缩齿：$\delta_{a1}=\delta_1+\theta_{f2}$　$\delta_{a2}=\delta_2+\theta_{f1}$
14	齿根圆锥角	δ_f	$\delta_{f1}=\delta_1-\theta_{f1}$　$\delta_{f2}=\delta_2-\theta_{f2}$
15	齿顶圆直径	d_a	$d_{a1}=d_1+2h_{a1}\cos\delta_1$　$d_{a2}=d_2+2h_{a2}\cos\delta_2$
16	齿根圆直径	d_f	$d_{f1}=d_1-2h_{f1}\cos\delta_1$　$d_{f2}=d_2-2h_{f2}\cos\delta_2$
17	当量齿数	z_v	$z_{v1}=z_1/\cos\delta_1$　$z_{v2}=z_2/\cos\delta_2$
18	当量齿轮分度圆半径	r_v	$r_{v1}=\frac{d_1}{2\cos\delta_1}$　$r_{v2}=\frac{d_2}{2\cos\delta_2}$

续上表

序号	名　称	代号	计算公式和选用说明
19	当量齿轮齿顶圆半径	r_{va}	$r_{va1}=r_{v1}+h_{a1}$　$r_{va2}=r_{v2}+h_{a2}$
20	当量齿轮齿顶压力角	α_{va}	$\alpha_{va1}=\cos^{-1}\left(\frac{r_{v1}\cos\alpha}{r_{va1}}\right)$　$\alpha_{va2}=\cos^{-1}\left(\frac{r_{v2}\cos\alpha}{r_{va2}}\right)$
21	重迭系数	ε	$\varepsilon=\frac{1}{2\pi}[z_{v1}(\mathrm{tg}\alpha_{va1}-\mathrm{tg}\alpha)+z_{v2}(\mathrm{tg}\alpha_{va2}-\mathrm{tg}\alpha)]$
22	大端分度圆齿厚	s	① $s_1=m\left(\frac{\pi}{2}+2x_1\mathrm{tg}\alpha+x_{t1}\right)$　$s_2=m\left(\frac{\pi}{2}-2x_1\mathrm{tg}\alpha-x_{t1}\right)$
23	大端齿顶圆齿厚	s_a	$s_{a1}=s_1\frac{r_{va1}}{r_{v1}}-2r_{va1}(\mathrm{inv}\alpha_{va1}-\mathrm{inv}\alpha)$ $s_{a2}=s_2\frac{r_{va2}}{r_{v2}}-2r_{va2}(\mathrm{inv}\alpha_{va2}-\mathrm{inv}\alpha)$
24	大端分度圆弦齿厚	$\bar{s}$	$\bar{s}_1=s_1-\frac{s_1^3}{6d_1^2}$　$\bar{s}_2=s_2-\frac{s_2^3}{6d_2^2}$
25	大端分度圆弦齿高	$\bar{h}_a$	$\bar{h}_{a1}=h_{a1}+\frac{s_1^2}{4d_1}\cos\delta_1$　$\bar{h}_{a2}=h_{a2}+\frac{s_2^2}{4d_2}\cos\delta_2$

① 直齿圆锥齿轮基准齿形压力角$\alpha=20°$，切向变位系数x_{t1}，x_{t2}，$x_{t2}=-x_{t1}$。如无切向变位，则$x_{t1}=x_{t2}=0$。

② 指参考文献〔1〕。

3.2 轮系

一系列互相啮合的齿轮将主动轴和从动轴连接起来，这种多齿轮的传动系统称为轮系。

3.2.1 定轴轮系

轮系运转时，各齿轮的几何轴线位置都是固定的，这种轮系称为定轴轮系。如图 1.1.2-24，和图 1.1.2-25 所示。

图 1.1.2-24 为汽车变速箱传动系统，有三档顺车，一档倒车。第一档，由轮 1-2-3-8，第二档 1-2-4-7，第三档牙嵌式离合器MM′搭上，输入轴直接输出，第四档 1-2-5-6-7，倒车输出。

$$\text{定轴轮系的传动比}=\frac{\text{所有各对啮合齿轮中的从动轮齿数的连乘积}}{\text{所有各对啮合齿轮中的主动轮齿数的连乘积}} \tag{1.1.2-18}$$

图 1.1.2-25，的传动比为

$$i_{15}=\frac{n_1}{n_5}=-\frac{z_3\cdot z_4\cdot z_5}{z_1\cdot z_3'\cdot z_4'}$$

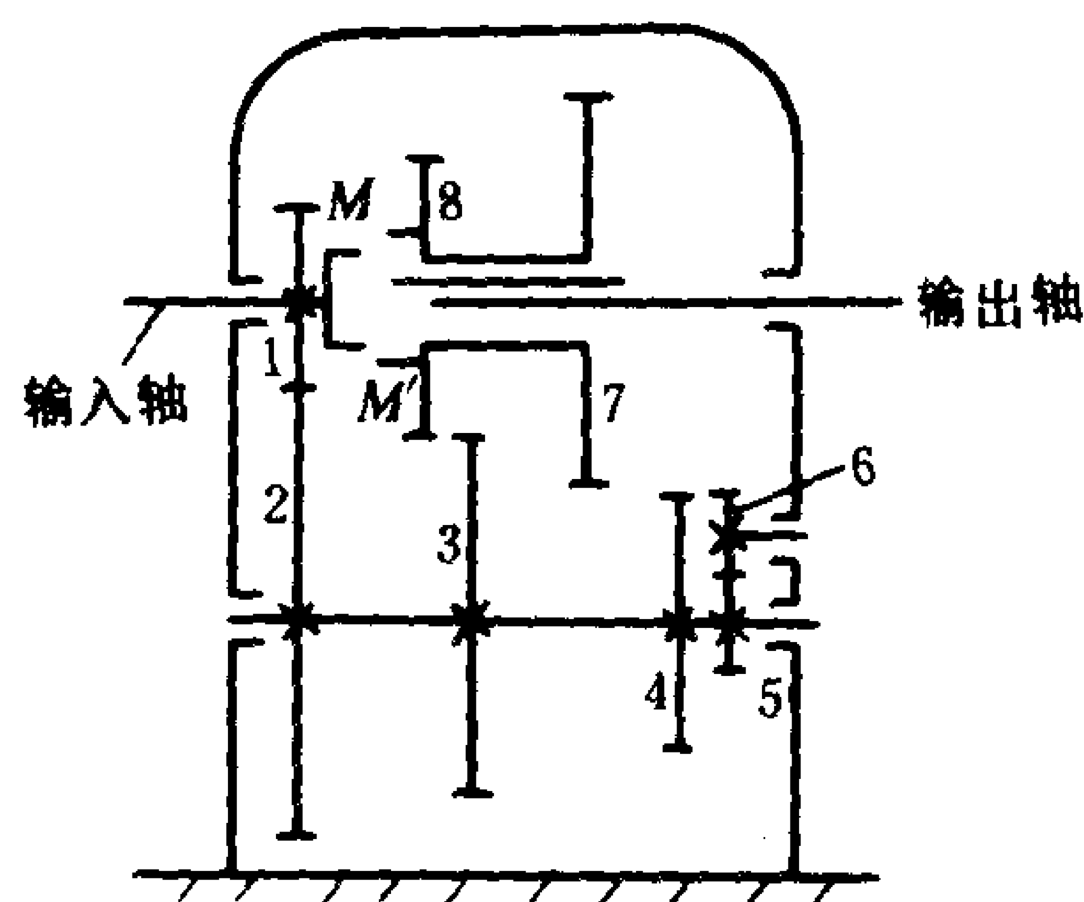


图 1.1.2-24　汽车变速箱传动系统简图

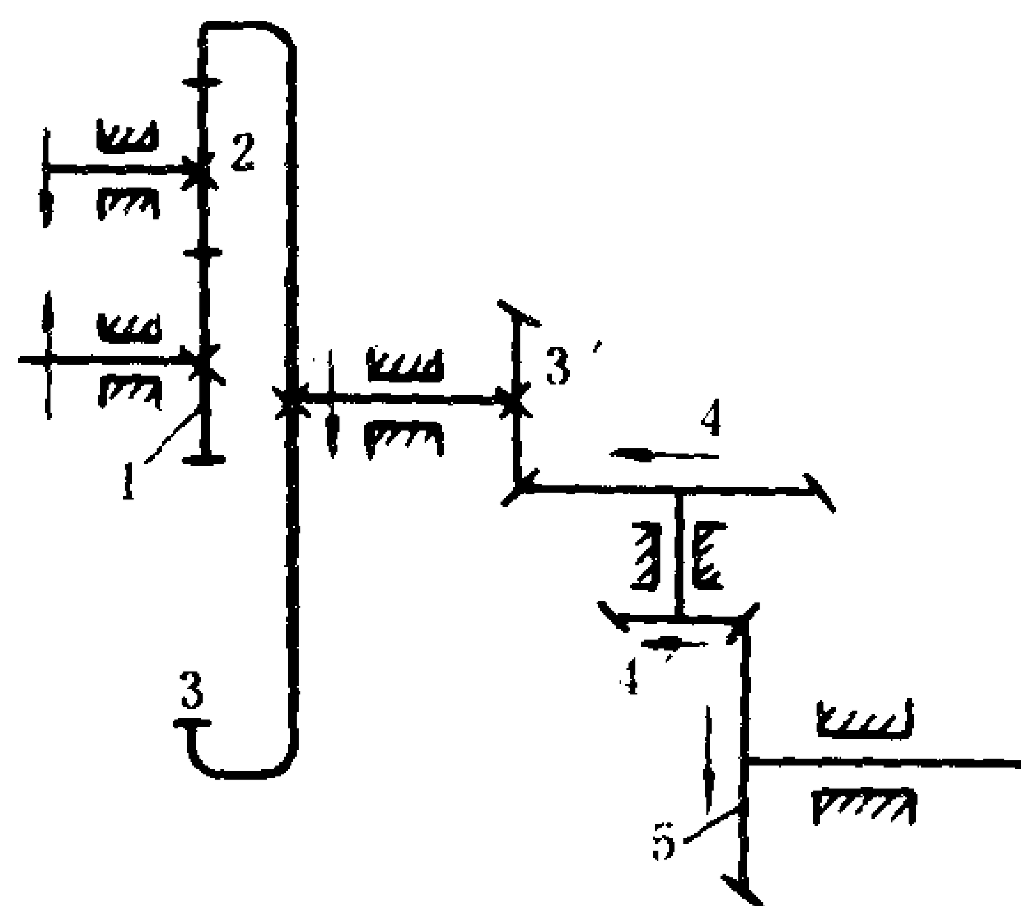


图 1.1.2-25　空间定轴轮系

n_1、n_5——为轮1及轮5的每分钟转数；

“－”——表示轮1与轮5转向相反。

3.2.2 周转轮系

轮系运转时，轮系中至少有一轮的几何轴线是绕另一齿轮的几何轴线回转的，称为周转轮系（如图1.1.2-26、图1.1.2-27、图1.1.2-28所示）。

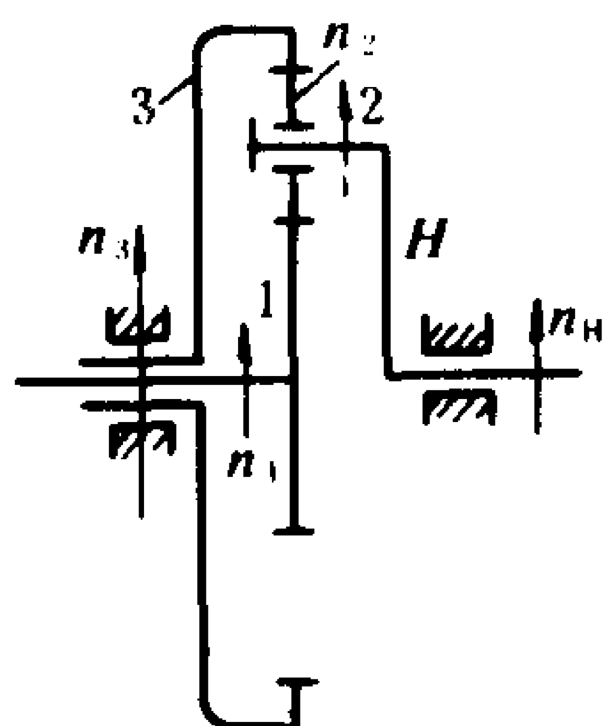


图1.1.2-26 差动轮系

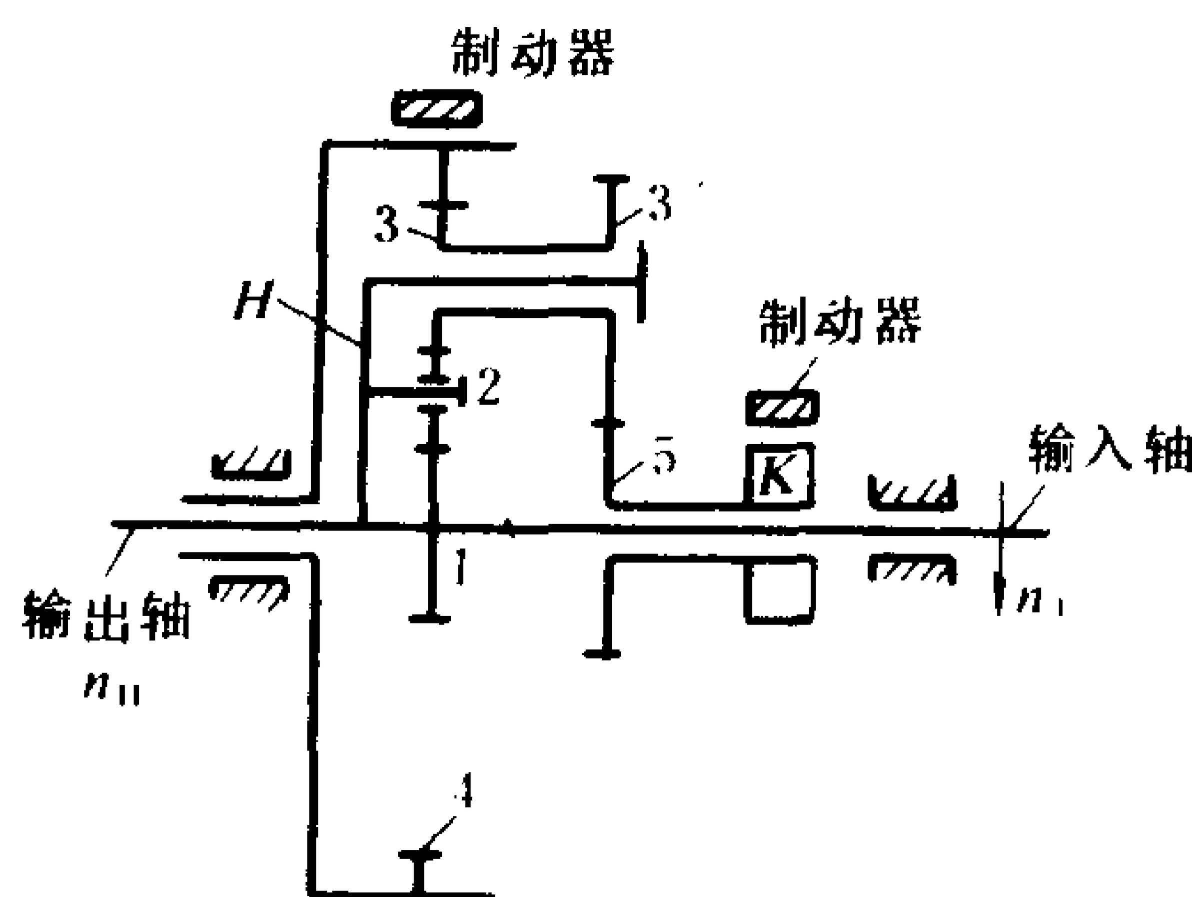


图1.1.2-27 柴油机倒、顺车传动系统

图1.1.2-26中，轮1、3为中心轮，轮2为行星轮及系杆H，各轮的绝对转速分别为n_1、n_2、n_3、n_H且转向相同，其齿数分别为z_1、z_2、z_3，传动比是

$$i_{13}^{H}=\frac{n_1-n_H}{n_3-n_H}=-\frac{z_3}{z_1} \qquad (1.1.2\text{-}19)$$

上式表明在三个活动构件1、3及H中，必须知道任意两个构件的运动（例如n_3、n_H），才能求出第三个构件的运动（例如n_1）。这种具有两个自由度的周转轮系，称为差动轮系。

若齿轮3固定不动，则$n_3=0$ 上式为

$$i_{13}^{H}=\frac{n_1-n_H}{-n_H}=-\frac{z_3}{z_1}$$

由此式可知，只要知道1和H两构件中任一构件的运动时，则另一构件的运动便可求出，这种具有一个自由度的周转轮系，称为行星轮系。行星轮系必有一个中心轮固定不动。

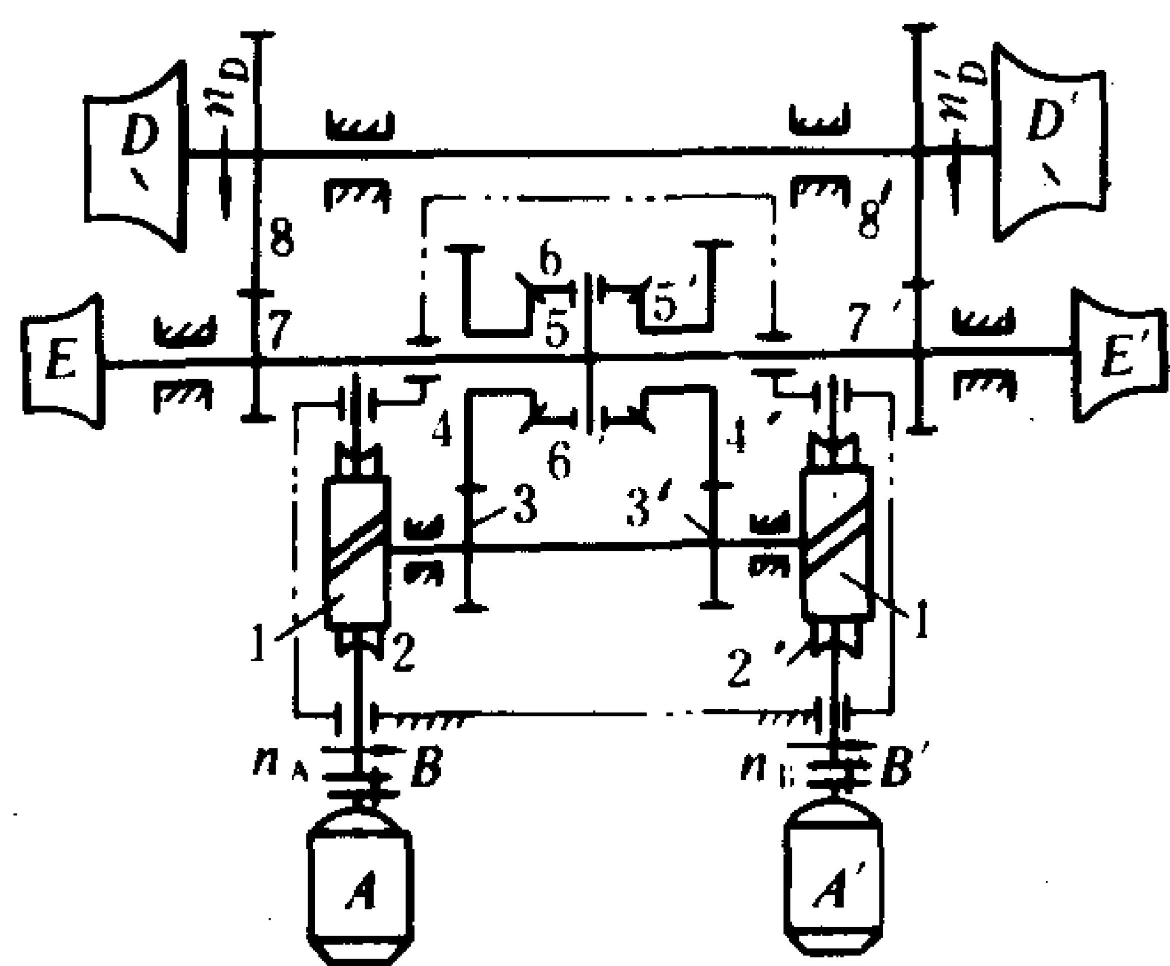


图1.1.2-28 电动起锚机传动系统

图1.1.2-27为用于柴油机倒、顺车的传动系统图，制动器可分别制动K和内齿轮4。顺车时，制动K，其传动比为；

$$i_{1H}=\frac{n_1}{n_H}=1+\frac{z_3z_5}{z_1z_3'}$$ $\because \frac{n_1}{n_H}$为正值，故轮1与系杆H转向相同，倒车时，制动内齿轮4，其传动比为；

$$i_{1H}=\frac{n_1}{n_H}=1-\frac{z_4}{z_1}$$ $\because z_4>z_1$故$\frac{n_1}{n_H}$为负值，轮1与系杆H转向相反。

图1.1.2-28为电动起锚机传动系统图，A和A'为电动机，B、B'为联轴节，1、2为蜗杆蜗轮，3、4是齿轮，5、6和5′、6′构成圆锥齿轮差速器，

7、8为开式齿轮，E、E'是缆绳卷筒，D、D'为锚链轮；当两电机A、A'以图示方向同转速同时启动时，行星轮6不发生自转，只随轮7轴线公转。但当两电机转速不同，或只开一个电机时，行星轮6产生自转，起差速作用，使电机来的两个不同转速合并成一个转速，传到缆绳卷筒E及锚链轮D上去，若蜗杆头数$z_1=1$，且为右旋，$z_5=z'_5$，从蜗杆1至轮8的传动比

当电机A、A'同时启动且转速相同时：

$$i_{18}=\frac{n_1}{n_8}=\frac{n_A}{n_D}=\frac{z_2 \cdot z_4 \cdot z_8}{z_1 \cdot z_3 \cdot z_7}$$ （锚链轮D转向如图所示）

当电机A'不启动，单独启动电机A时：

$$i_{18}=\frac{n_1}{n_8}=\frac{n_A}{n_D}=\frac{2z_2 \cdot z_4 \cdot z_8}{z_1 \cdot z_3 \cdot z_7}$$ （锚链轮D转向如图所示）

3.2.3 常用行星传动的类型及基本特性，见表1.1.2-20。

表1.1.2-20 **常用行星传动的类型及基本特性**

传动型式代号	传动简图	基本性能			说明
		传动比范围	效率	最大功率(千瓦)	
① NGW	3 2 H 1	3固定时：$i_{1H}=1+\frac{z_3}{z_1}=3\sim9$ 1固定时：$i_{3H}=1+\frac{z_1}{z_3}=$ $1.14\sim1.59$	0.97～0.99	达6500	效率高，体积小，重量轻，结构简单，但传动比小，在机械传动中广泛应用
NW	3 2 2' 1	3固定时：$i_{1H}=1+\frac{z_2z_3}{z_1z_2'}$ $=5\sim25$ 1固定时：$i_{3H}=1+\frac{z_1z_2'}{z_2z_3}$ $=1.071\sim2$	0.97～0.99	达6500	与NGW比较，传动比大，径向尺寸小，结构复杂，用于减速和增速传动中
WW	2 2' H 1 3	$i_{H1}=\frac{1}{1-\frac{z_2z_3}{z_1z_2'}}$ $=1.2\sim$几千	随i_{H1}的增加而急剧下降	≤15	用于传递运动，不用于动力传动，当系杆H从动时，需验算是否自锁
NN	3 1 H 2' 2	$i_{H1}=\frac{1}{1-\frac{z_2z_3}{z_1z_2'}}$ $=30\sim100$ 小功率传动时，i_{H1}可达1700	随i_{H1}的增加而下降	≤30	用于短期工作的传动，当轮1主动时，需验算是否自锁

续上表

传动型式代号	传动简图	基本性能			说明
		传动比范围	效率	最大功率（千瓦）	
ZUWGW		差动传动 $\frac{n_1-n_H}{n_3-n_H}=-\frac{z_3}{z_1}=-1$ 行星传动（轮3固定） $i_{1H}=1+\frac{z_3}{z_1}=2$	0.94～0.98	＜60	用于差动装置
N		$i_{HV}=-\frac{z_2}{z_1-z_2}=7\sim71$	0.8～0.94	＜45	用于短期工作的传动（摆线针轮减速器除外）适用于小功率
NGWN		$i_{14}=\frac{(z_1+z_3)\ z_2z_4}{z_1\ (z_2z_4-z_2'z_3)}$ ＝20～100 最合理 当功率不大时 i_{14} 可达 500 以上	随 i_{14} 的增加而下降	＜96	适用于中小功率短期工作

① N表示内啮合，G表示公用齿轮，W表示外啮合，ZU表示锥齿轮。

3.2.4 渐开线少齿差行星减速器

渐开线少齿差行星减速器采用渐开线齿廓的齿轮，它的传动简图如图 1.1.2-29，它是由固定的内齿轮 1、行星轮 2、系杆H、等角速比机构 3 以及轴B所组成。它的输入运动是系杆H，输出运动是行星轮 2 的回转运动，其传动比是：

$$i_{HB}=i_{H2}=-\frac{z_2}{z_1-z_2} \tag{1.1.2-20}$$

当齿数差z_1-z_2很小时，传动比i_{HB}很大，若$z_1-z_2=1$时，则为一齿差的行星减速器，其传动比：$i_{HB}=-z_2$

将行星轮 2 的平移和回转的复合运动，用输出机构将行星轮的转动传到输出轴B上去，它可采用双万向联轴节、浮动盘式联轴节以及销轴式联轴节等机构。销轴式联轴节的构造原理如图 1.1.2-30 所示，在行星轮 2 的辐板上沿半径为R的圆周上开了K个半径为r_W的均布圆孔(图中为 6 孔)、而在输出轴 3 的圆盘上沿同样半径R的圆周上也装了K个圆柱销，并在销轴上套上外半径为r_p的销套，这些带套的圆柱销分别置于行星轮幅板的圆孔中，从而将行星轮和输出轴连接起来。设计时，使中心距$O_2O_3=r_W-r_p$，因$O_2O_W=R=O_3O_p$，故$O_2O_3O_pO_W$为一平行四边形，因此，不论行星

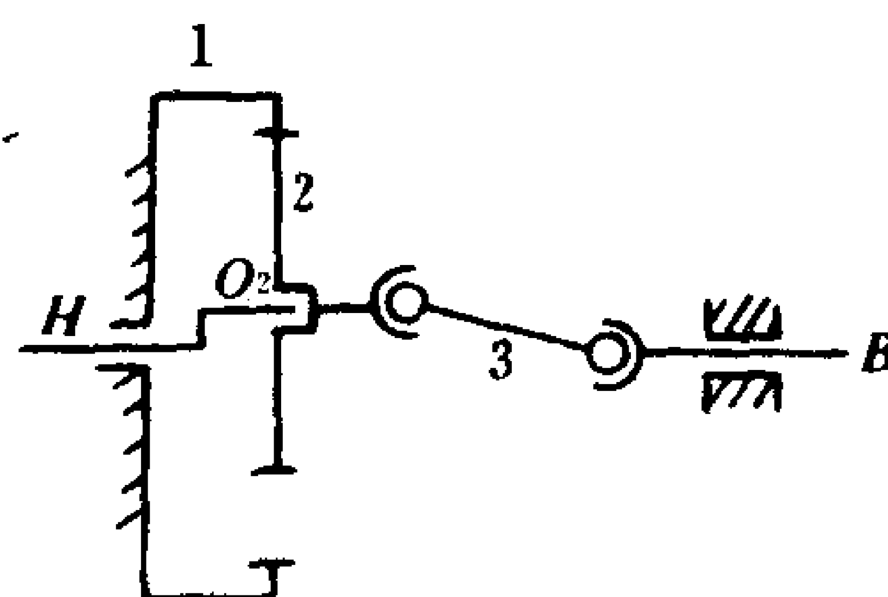


图 1.1.2-29 少齿差行星传动示意图

轮 2 转到任何位置，O_3O_p总平行于O_2O_w，这就使输出轴 3 的转速始终与行星轮 2 的转速相同。

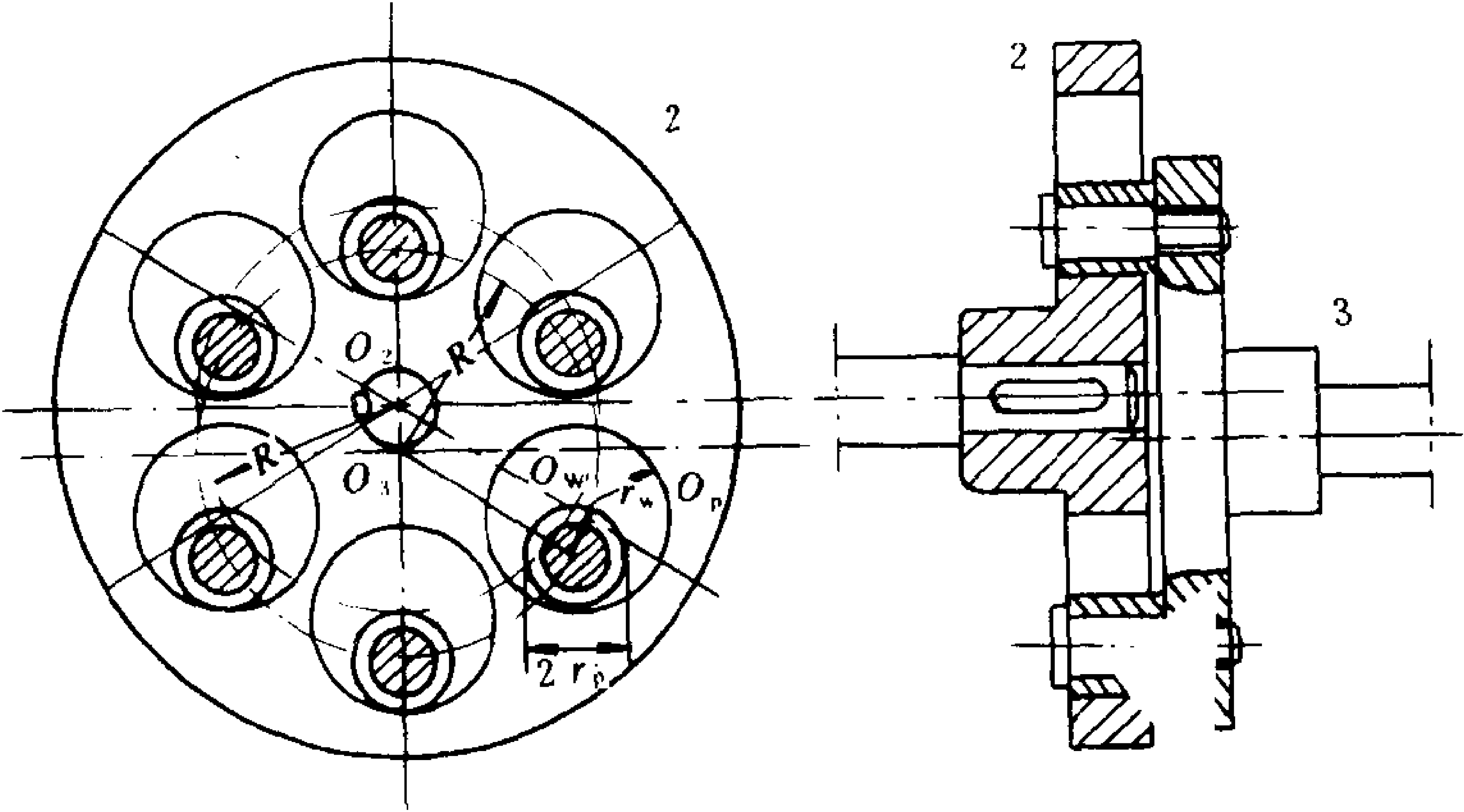


图 1.1.2-30　销轴式联轴节构造原理图

3.2.5　摆线针轮行星减速器

它主要由四部分组成（见图 1.1.2-31）

1)系杆　由输入轴 4 以及在其上固结的互相错开 180°的偏心套 5 组成，它们起着行星传动系杆的作用。

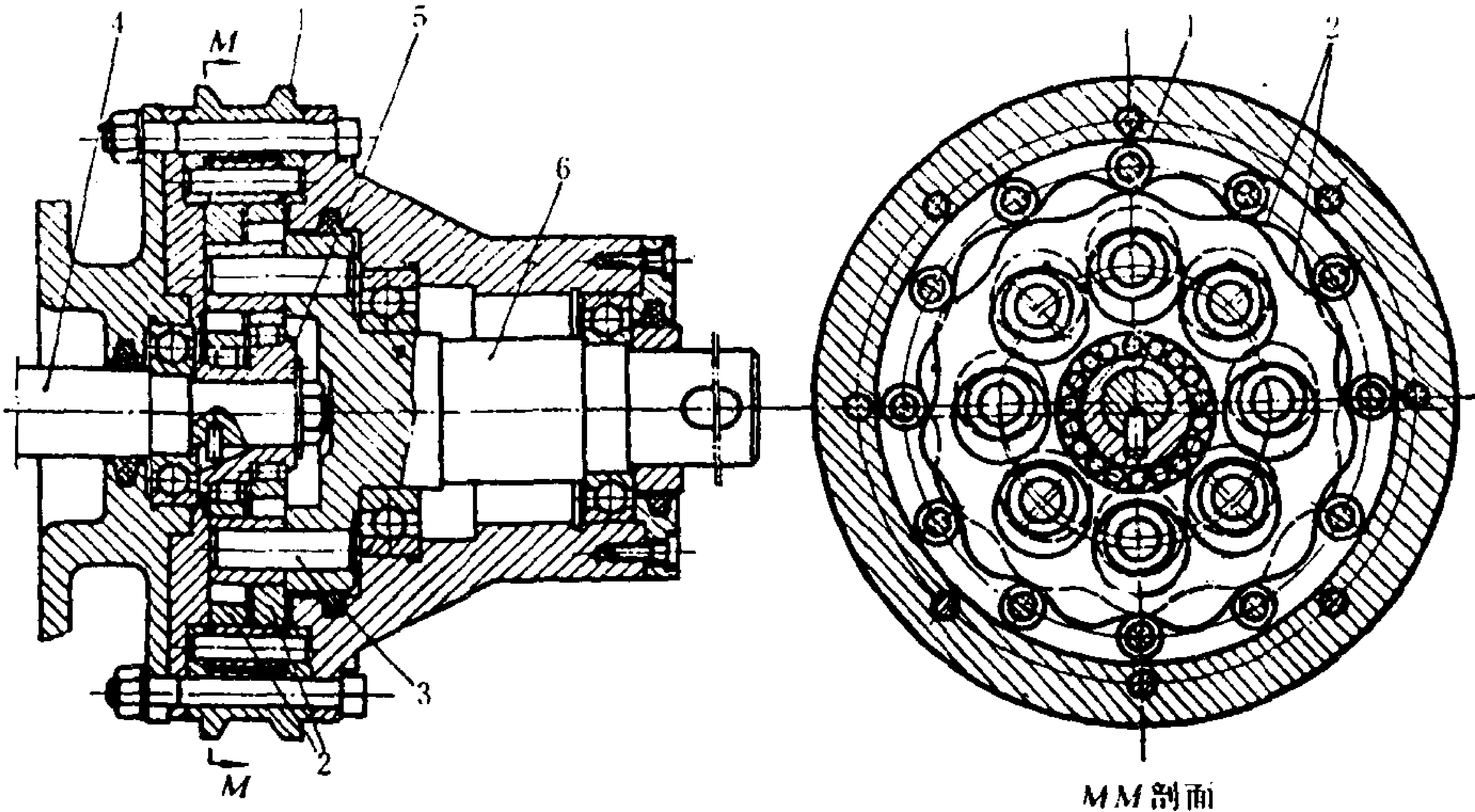


图 1.1.2-31　摆线针轮行星减速器结构图

2)摆线行星轮（图中 2）　为了平衡和提高承载能力，通常采用两个完全相同的奇数齿，其内孔与滚子轴承的外径配合，并与滚子轴承一起分别装在双偏心套 5 上。

3)针轮（中心轮）　它是固定在壳体上的环状体 1，在它的圆周上，装有许多带套的圆柱销，它们一起构成中心轮。

4)输出机构　它与图 1.1.2-30 相同；3 为连接两行星轮和输出轴 6 的销轴式输出机构。

摆线针轮行星减速器是一种一齿差的减速器，它的传动比$i_{HB}=-z_2$(行星轮齿数)，其传递功率一般为 0.5～50 kW，短期工作时可达 100 kW，最大扭矩可达 37 000 Nm。

这种减速器的主要优点是：传动比大(一级减速的$i_{HB}=9\sim115$)，并且效率高(一般可达 0.9～0.94)，它与相同功率、相同传动比的普通减速器相比，具有体积小、重量轻的优点。摆线轮的磨损很小，使用寿命长，传动平稳，承载能力高。并无齿廓重迭干涉现象。它的主

要缺点是加工工艺复杂、制造精度要求较高。

3.2.6 谐波齿轮传动

谐波齿轮传动是利用行星轮系传动原理发展起来的一种新型传动；它的典型结构如图1.1.2-32所示。它是由刚轮1、柔轮2和波发生器H三个主要部件组成的。刚轮是一个被固定在机壳上的外齿圈；柔轮是一个容易产生弹性变形的薄壁筒形齿圈；柔轮比刚轮少一个或几个齿，但它们轮齿的周节相同；波形发生器是由一个椭圆盘和一个薄壁的滚珠轴承所组成(图1.1.2-33)。也可以由一个转臂和几个滚子所组成（图1.1.2-34和图1.1.2-35)。

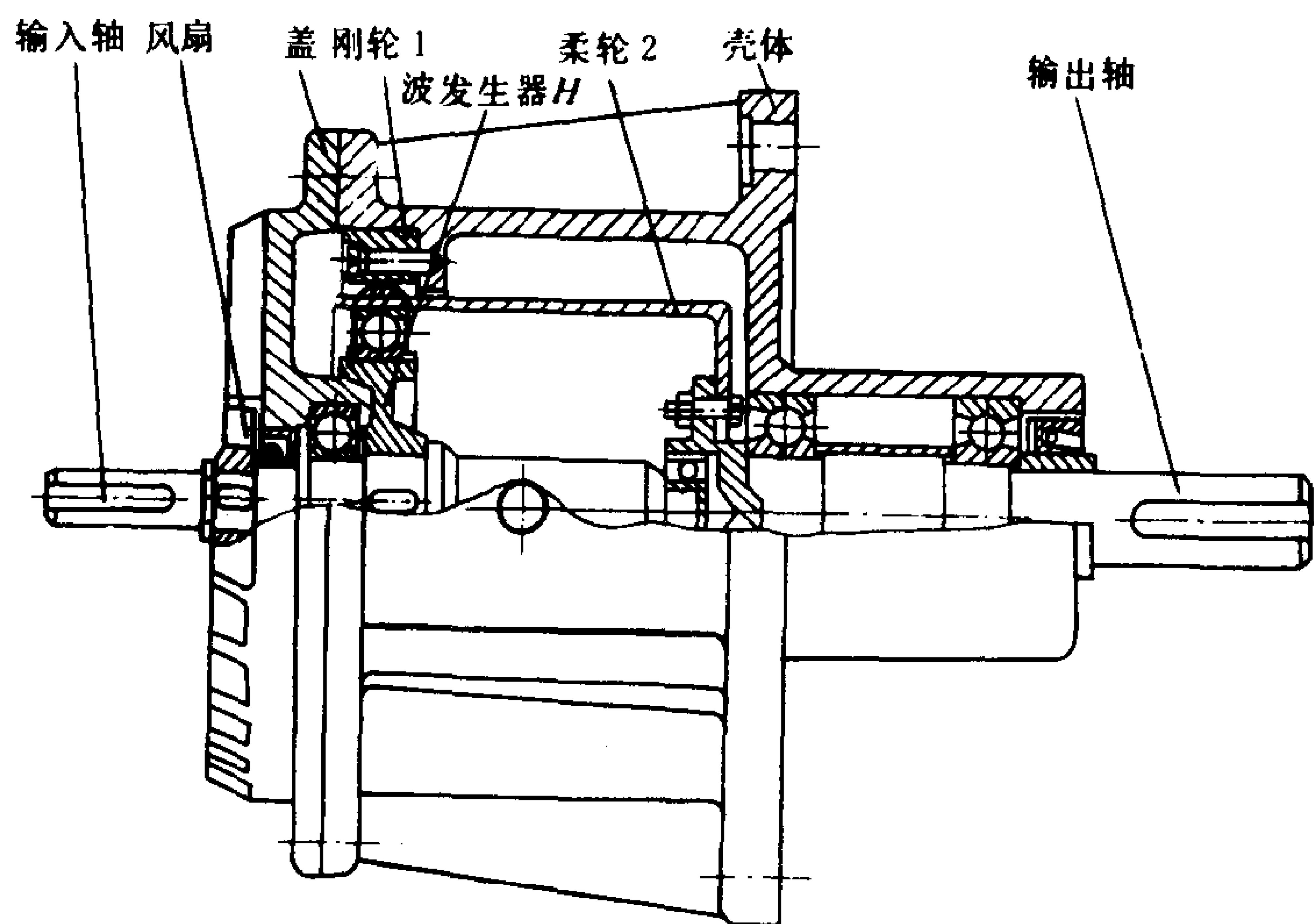


图1.1.2-32 谐波齿轮传动典型结构

谐波齿轮传动的三个构件其中一个固定，其余两个一为主动，另一为从动，但通常均以波形发生器为主动件。

它的工作原理如下（图1.1.2-35)：图中波型发生器H为主动件，刚轮1为固定件，当波型发生器装配入柔轮2的内孔时，迫使柔轮弹性变形至椭圆形状态，在其长轴两端的齿与刚轮1的齿完全啮合，同时短轴两端的齿与刚轮的齿脱开，至于其余各处的齿，分别处于“啮入”或“啮出”的状态。当波形发生器回转时，柔轮的长短轴位置不断改变，从而齿的啮合处和脱开处也随之不断地改变，并且波形发生器上的滚子迫使柔轮的齿依次地和刚轮的齿啮合，当波形发生器逆时针转动一周时，柔轮2顺时针转了(z_1-z_2)个齿，故波形发生器和柔轮的传动比为：

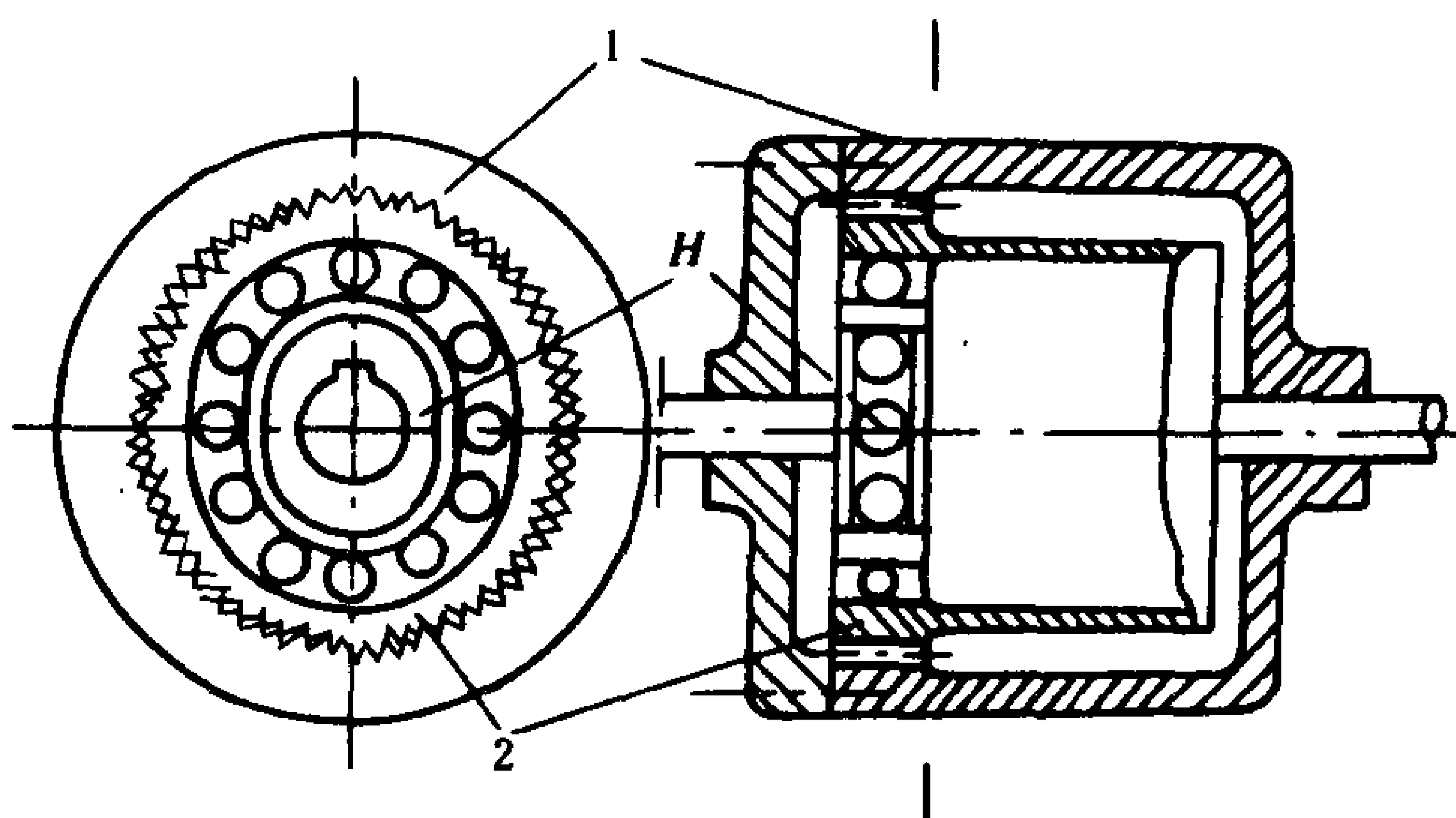


图1.1.2-33 椭圆盘波形发生器

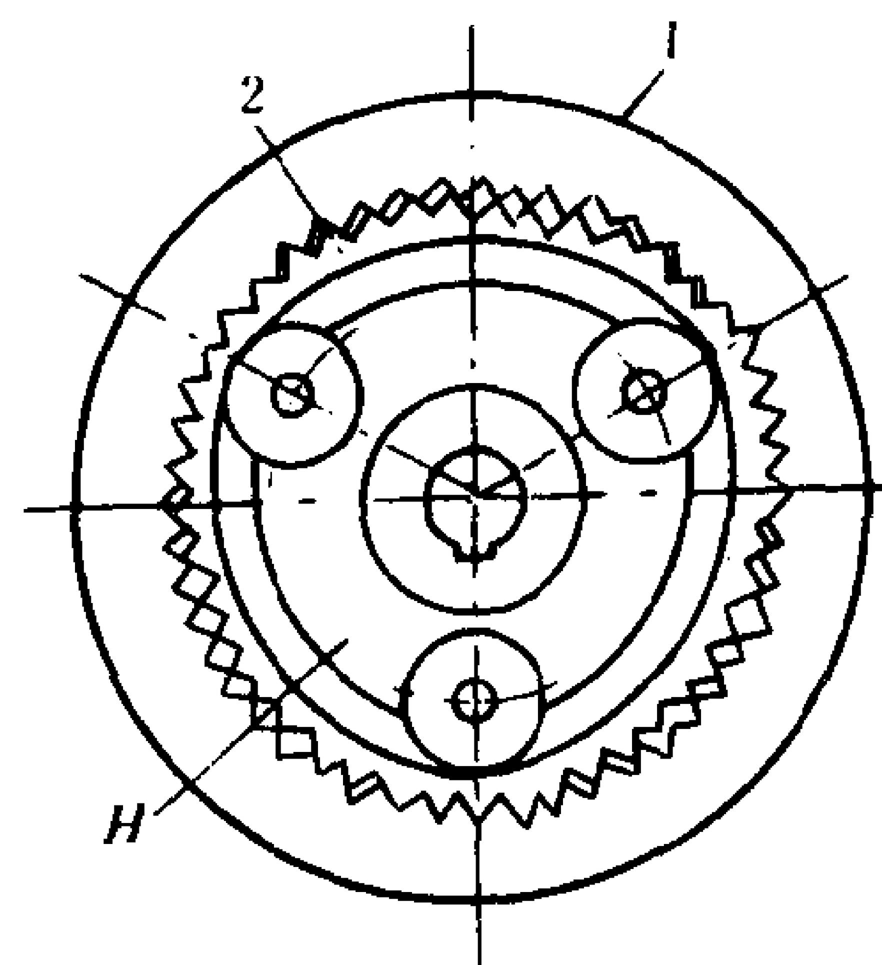


图1.1.2-34 三滚子波发生器

$$i_{H2}=\frac{n_H}{n_2}=-\frac{z_2}{z_1-z_2}$$ （负号表示转向相反）

式中，z_1、z_2分别为刚轮和柔轮的齿数。

若柔轮固定不动而刚轮为从动件，则波形发生器和刚轮的传动比为：

$$i_{H1}=\frac{n_H}{n_1}=\frac{z_1}{z_1-z_2} \quad （转向相同）$$

谐波齿轮传动与一般的齿轮传动相比的主要优点是：传动比大，一级减速时，一般$i_{H2}=60\sim250$。这种传动同时啮合的齿数多，故承载能力较高，运动误差小，无冲击，齿的磨损小，它的效率单级传动时一般可达 0.6～0.96 范围；它的零件少、体积小、重量轻，且密封性好。传递功率自几十瓦至数十千瓦，但后者都用于短期工作的场合。

这种传动的主要缺点是柔轮容易疲劳损坏。

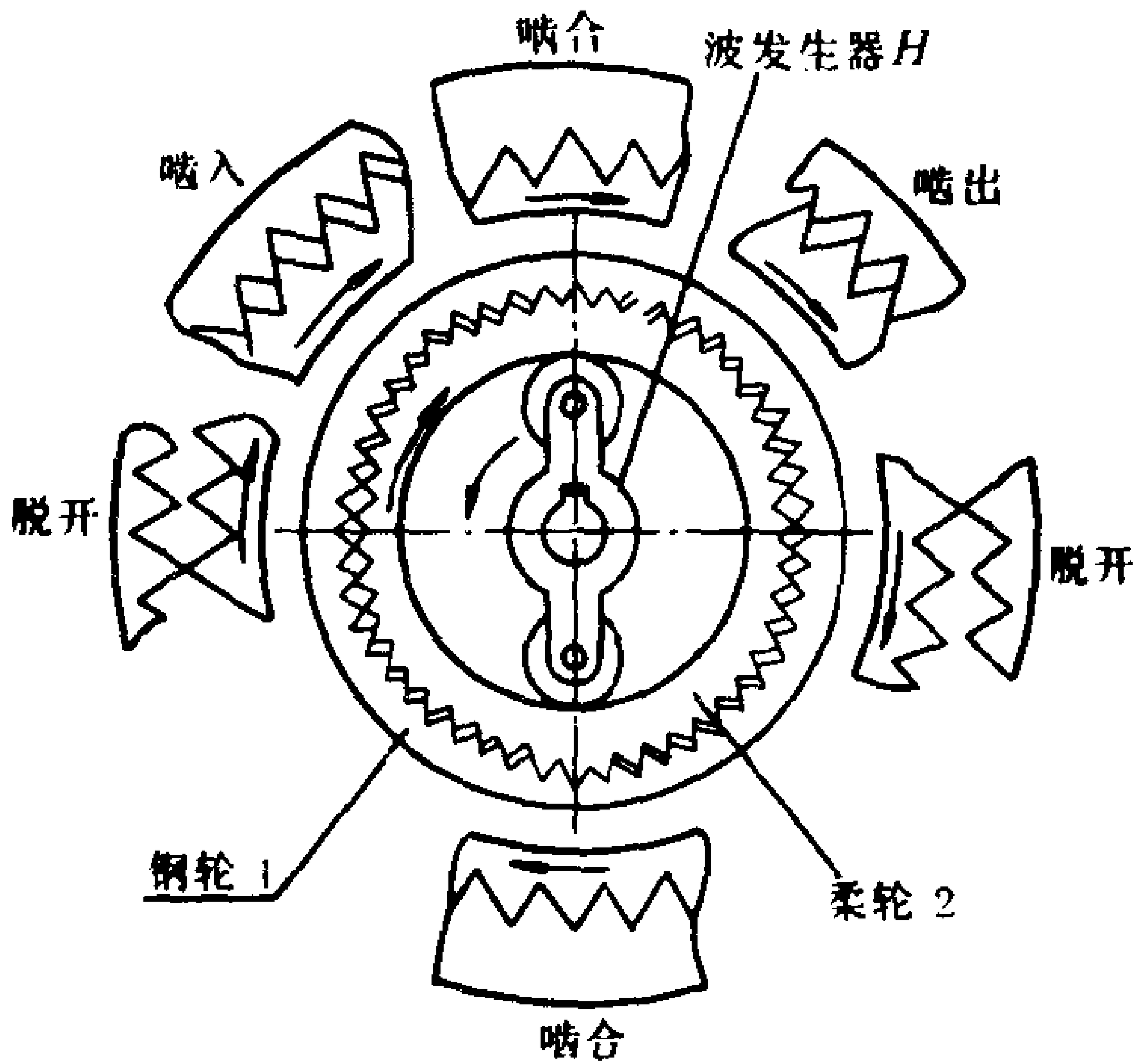


图 1.1.2-35　传动工作原理

4　平面连杆机构

平面连杆机构是由许多刚性构件用低副连接而成的机构，所以又称为低副机构。四杆机构是平面连杆机构中最基本的型式，以曲柄摇杆机构和曲柄滑块机构为基础，分别选取不同构件为机架时就可以得到不同型式的机构。平面四杆机构的基本类型、尺寸关系、以及运动特性见表 1.1.2-21。

表 1.1.2-21　　**平面四杆机构的基本型式，各杆长度关系及其运动特性**

机架构件	机构类型及各杆长度关系	运动特性	机构类型及各杆长度关系	运动特性
1	① 曲柄摇杆机构 1）最短杆 1 与最长杆长度之和≤其它两杆长度之和 2）最短杆为曲柄 1 3）杆 2 及杆 4 中任一为机架	1）当曲柄作等速回转时，摇杆 3 变速摆动 2）连杆 2 作平面复杂运动 3）曲柄主动时无死点位置 4）摇杆主动时，死点位置为C'及C''	曲柄滑块机构 曲柄 1 的长度＜连杆 2 的长度	1）当曲柄主动时无死点位置 2）滑块主动时死点位置为B'，B''两个 3）曲柄等速转动时滑块作变速移动 4）滑块行程$s=2\times$（曲柄长度）

机架构件	机构类型及各杆长度关系	运动特性	机构类型及各杆长度关系	运动特性
2	双曲柄机构 1)最短杆 1 与最长杆长度之和≤其它两杆长度之和 2)最短杆为机架 1	1)若构件 2 作等角速转动，构件 4 则作变速角转动。 2)无死点位置 3)平行四边形机构有两个死点位置且 $i=\frac{\omega_2}{\omega_4}=1$	转动导杆机构 机架 1 的长度（AB）＜转动构件 2 的长度	1)转动构件 2（曲柄）主动时，无死点 2)导杆 4 主动时，无死点 3)传动比 $i=\frac{\omega_2}{\omega_4}\neq$ 常数 4)平均传动比 $i=\frac{n_2}{n_4}=1$
3	曲柄摇杆机构 与固定构件 4 相同	摇杆主动时死点位置为 D' 及 D'' 曲柄主动时无死点位置	曲柄摇块机构 曲柄 1 的长度＜机架 2（BC）的长度	1)曲柄 1 为主动件时，无死点 2)摇块 3 为主动件时，死点位置在 A'、A''
4	双摇杆机构 1)最短杆 1 与最长杆之和≤其它两杆之和 2)最短 1 作连杆，它的相对杆 3 作机架 3)若最短杆与最长杆之和＞其它两杆长度之和，任何杆为机架	1)构件 2，构件 4 任一构件为主动，均有两个死点位置，(图示情况)	移动导杆机构 连杆 1 的长度＜摇杆 2 的长度	

① 四杆机构中，固定杆为机架，与机架相连的杆称为连架杆，若连架杆能作整周回转的，称为曲柄，不能作整周回转的称为摇杆，机架相对的杆，称为连杆。

5 联接

5.1 螺纹联接

5.1.1 机械制造中常用的螺纹

表 1.1.2-22 列出了机械制造中常用的螺纹牙型、标准编号和螺纹代号示例。

表 1.1.2-22　　常用螺纹的种类

种类		牙型图	标准编号	螺纹代号
普通螺纹（粗牙与细牙）			GB196-81	粗牙，公称直径为 24 mm，螺距为 3 mm的代号：M24 细牙，公称直径为 24 mm，螺距为 1.5 mm的代号：M24×1.5
管螺纹	55°圆柱管螺纹		英制（查机械零件手册）	公称直径 2″，左旋的代号：G2″左（右旋不标）
	55°圆锥管螺纹			公称直径 $1\frac{1}{2}$″，左旋的代号：ZG $1\frac{1}{2}$″左（右旋不标）
	60°圆锥管螺纹			公称直径为 3/4″，左旋的代号：Z 3/4″左（右旋不标）
矩形螺纹			未标准化	—
梯形螺纹			GB5796-86	$d=40$ mm，$P=6$ mm左旋的代号：Tr 40×6 LH $d=40$ mm，$S=12$ mm双线，右旋的代号：Tr 40×12（p 6）
30°锯齿形螺纹			JB923-66	$d=70$ mm，$P=10$ mm 单线，右旋，1 级精度代号：S 70×10−1 $d=70$ mm，$S=20$ mm 双线，左旋，2 级精度代号：S 70×20/2−2 左

注：表中P为螺距，S为导程。

普通螺纹和管螺纹的剖面为三角形，主要用于联接；矩形、梯形和锯形螺纹主要用于传动。

5.1.2 螺纹联接的基本类型

表 1.1.2-23 **螺纹联接的基本类型**

类型	结　　构	尺寸关系	特 点 和 应 用
螺栓联接	受拉螺栓 铰制孔螺栓	螺纹余留长度 ℓ， 受拉螺栓联接 静载荷 $\ell_1 \geq$ (0.3~0.5) d 变载荷 $\ell_1 \geq 0.75d$ 冲击、弯曲载荷 $\ell_1 \geq d$ 铰制孔螺栓联接 ℓ_1尽量小螺纹伸出长度 $\ell_2 \approx$ (0.2~0.3) d螺栓轴线到被联接件边缘距离 $e=d+$ (3~6) mm	用于通孔，损坏后易更换，结构简单，使用时不受被联接件材料限制 铰制孔螺栓联接，能精确固定被联接件的相对位置，并能承受横向载荷
双头螺栓联接		螺纹旋入深度 ℓ_3，当螺纹孔材料为： 钢或青铜 $\ell_3 \approx d$ 铸铁 $\ell_3 \approx$ (1.25~1.5) d 铝合金 $\ell_3 \approx$ (1.5~2.5) d 螺纶孔深度 $\ell_4 \approx \ell_3+$ (2~2.5) p 钻孔深度 $\ell_5 \approx \ell_4+$ (0.5~1) d ℓ_1、ℓ_2、e值同螺栓联接	允许多次装拆而不损坏被联接零件，因此，多用于音孔，而且被联接件需经常拆卸的地方
螺钉联接			螺钉直接拧入被联接件的螺纹孔中，不用螺母，其用途和双头螺栓相似，但多用于受力不大，且不需要经常拆卸的场合

续上表

类型	结　构	尺寸关系	特 点 和 应 用
紧定螺钉联接	d		用以固定两个零件的相对位置，可传递不大的力和扭矩

5.1.3 螺纹联接的防松装置

防松的根本问题，在于防止螺纹副相对转动。防松的方法很多，表 1.1.2-24 列出了常用的几种方法。

表 1.1.2-24　　**常用的防松方法**

防松方法		结 构 型 式	特 点 和 应 用
摩擦防松	对顶螺母	对顶螺母	两螺母对顶拧紧后，使螺纹间始终受到附加压力和摩擦力的作用 结构简单，适用于平稳、低速和重载的联接
	弹簧垫圈	弹簧垫圈	螺母拧紧后，靠垫圈被压平后产生的弹性反力使螺纹间保持压紧力和摩擦力 结构简单，但由于垫圈弹力不均，其防松效果较差，多用于不甚重要的联接
	尼龙圈锁紧螺母	尼龙圈锁紧螺母	利用螺母末端的尼龙圈箍紧螺栓，横向压紧螺纹 结构简单，还能起防止液体泄漏的作用

防松方法		结构型式	特点和应用
机械防松	槽形螺母和开口销	槽形螺母和开口销	利用开口销防止螺栓对螺母作相对运动。也可用普通螺母代替槽形螺母，但需拧紧螺母后再配钻开口销孔 适用于振动与冲击较大的高速机械中
	圆螺母和带翅垫圈	圆螺母和带翅垫圈	使垫圈的内翅嵌入螺栓（或轴）的槽内，待拧紧螺母后，再将垫圈的外翅折入螺母的一个槽内 多用于滚动轴承内圈的轴向固定
	止动垫圈	止动垫圈	螺母拧紧后，将垫圈分别向螺母和被联接件的侧面折弯贴紧以防止螺母松动 使用方便；结构简单
	串联钢丝	串联钢丝	利用金属丝使一组螺钉头部相互约束，以防松动 多用在螺钉组的联接中

除上表介绍的防松方法外，若联接不需拆卸时，可以采用铆冲防松，即在螺母拧紧后，

利用冲头在螺栓末端与螺母的旋合缝处打冲。近年来还发展了一种粘合防松法，即用粘合剂涂在螺纹旋合表面，拧紧螺母后粘合剂能自动硬化，使螺旋副紧密粘合。这种防松方法，效果良好并有密封作用。

5.1.4 螺栓联接的强度计算

表 1.1.2-25　　**螺栓联接强度计算**

联接与受载类型		计算公式	符号意义
松螺栓联接（装配时，螺母不需拧紧，在受工作载荷之前，螺栓不受力）		$\sigma=\frac{F}{\frac{\pi}{4}d_1^2}\leq[\sigma]$ $d_1\geq\sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]}}$	F——螺栓所受的工作载荷，N d_1——螺栓危险剖面直径，mm $[\sigma]$——螺栓材料的许用拉应力，MPa
紧螺栓联接（在装配时需拧紧螺母，因此在承受工作载荷之前，螺栓已受预紧力F_p）	仅承受预紧力	$\sigma_{ca}=\frac{1.3F_p}{\frac{\pi}{4}d_1^2}\leq[\sigma]$	F_p——螺栓所受的预紧力，N 其余符号同上
	承受预紧力和工作拉力	$\sigma_{ca}=\frac{1.3F_o}{\frac{\pi}{4}d_1^2}\leq[\sigma]$ $F_o=F_p+\frac{C_1}{C_1+C_2}F$ $F_p=F_r+\frac{C_2}{C_1+C_2}F$ $F_r=(0.2\sim0.6)F$—工作载荷稳定 $F_r=(0.6\sim1)F$—工作载荷变化 $F_r=(1.5\sim1.8)F$—有密封性要求 $F_r\geqq F$—地脚螺栓联接 若工作载荷在O与F之间变化时，除按上述静强度计算外，还必须计算应力幅 $\sigma_a=\frac{C_1}{C_1+C_2}\cdot\frac{2F}{\pi d_1^2}\leq[\sigma_a]$	F_o——螺栓所受的总拉力，N $\frac{C_1}{C_1+C_2}$—相对刚度 金属垫片（或无垫片）$\frac{C_1}{C_1+C_2}=0.2\sim0.3$ 皮革垫片$\frac{C_1}{C_1+C_2}=0.7$ 铜皮石棉垫片$\frac{C_1}{C_1+C_2}=0.8$ 橡胶垫片$\frac{C_1}{C_1+C_2}=0.9$ C_1、C_2——螺栓和被联接件的刚度 F_r——剩余预紧力，N $[\sigma_a]$——螺栓许用应力幅，MPa 其余符号同上
紧螺栓联接	承受工作剪力	螺栓杆与孔壁的挤压强度 $\sigma_p=\frac{F_1}{d_oL_{min}}\leq[\sigma]_p$ 螺栓杆的剪切强度 $\tau=\frac{F_1}{\frac{\pi}{4}d_o^2}\leq[\tau]$	F_1——螺栓所受的工作剪力，N d_o——螺栓剪切面直径，mm L_{min}——螺栓杆与孔壁挤压面的最小高度，mm，设计时应使$L_{min}\geqq1.25d$。 $[\sigma]_p$——螺栓或孔壁材料的许用挤压应力，MPa $[\tau]$——螺栓材料的许用剪切应力，MPa

5.1.5 螺栓的材料及许用应力

适合制造螺栓的材料钢号很多，常用材料有A 2、A 3、10、35 和 45 号钢，对于承受冲击、振动或变载荷的螺纹联接，可采用 15 Cr、40 Cr、30 CrMnSi、15 MnVB等。表 1.1.2-26 为螺纹联接常用材料的机械性能。

螺栓联接件的许用应力与载荷性质（静载荷或变载荷）、装配情况（松联接或紧联接）以及联接件的材料、结构尺寸等因素有关，见表 1.1.2-27。

表 1.1.2-26　　**螺纹联接常用材料的机械性能（摘自GB 38—76）**

材　料	抗拉强度极限 σ_B MPa	屈服极限 σ_S MPa	疲劳极限MPa	
			弯曲σ_{-1}	拉压σ_{-1tc}
10	340～420	210	160～220	120～150
*A*2	340～420	220	—	—
*A*3	410～470	240	170～220	120～160
35	540	320	220～300	170～220
45	610	360	250～340	190～250
40*Cr*	750～1000	650～900	320～440	240～340

表 1.1.2-27　　**螺栓联接的许用应力**

受载类型	静　载　荷	变　载　荷
受拉螺栓联接	许用拉应力 $[\sigma]=\frac{\sigma_S}{[S]}$ σ_a——螺栓材料的屈服极限，MPa $[S]$ ——安全系数 (1) 不控制预紧力时 $[S]=\frac{2200K_m}{900-(70000-F_o)^2\times10^{-7}}$ 式中：K_m——材料系数：普通钢$K_m=1$ 合金钢$K_m=1.25$; F_o——螺栓总拉力，若$F_o>70,000$ N，取$F_o=70,000$ N (2) 控制预紧力时 用测力矩或定力矩扳手 $[S]=1.6\sim2$; 用测量螺纹伸长 $[S]=1.3\sim1.5$ (3) 无预紧力时（即松螺栓联接） 未经淬火的钢 $[S]=1.2$ 经淬火的钢 $[S]=1.6$	许用应力幅 $[\sigma_a]=\frac{\sigma_{alim}}{[S]_a}$ σ_{alim}——极限应力幅，MPa $\sigma_{alim}=\frac{\varepsilon K_t\cdot K_u}{K_\sigma}\sigma_{-1tc}$ 式中：ε——尺寸系数； K_t——螺纹制造工艺系数： 车制$K_t=1$；辗制$K_t=1.25$； K_u——螺纹牙受力不均系数： 受压螺母$K_u=1$； 部分或全部 受拉螺母$K_u=1.5\sim1.6$； σ_{-1tc}——材料拉压疲劳极限，见表 1.1.2-26 $[S]_a$——安全系数，一般取$[S]_a=2.5\sim4$
受剪螺栓联接	许用剪切应力 $[\tau]=\frac{\sigma_s}{[S]}$ $[S]=2.5$ 许用挤压应力$[\sigma]_p=\frac{\sigma_s}{1\sim1.25}$（钢） $[\sigma]_p=\frac{\sigma_B}{1.25}$（铸铁）	$[\tau]=\frac{\sigma_s}{S}$ $[S]=3.5\sim5$ $[\sigma]_p=\frac{\sigma_s}{1.6\sim2}$（钢） $[\sigma]_p=\frac{\sigma_B}{2}$（铸铁） $[\sigma]_p=10$ MPa（混凝土）

表 1.1.2-28　　　　键的类型、特点和应用

类型	图形与标准编号	特　点	应　用
平键	普通平键（GB 1096—79） 薄型平键（GB 1566—79） A型　B型　C型 导向平键（GB 1097—79） A型　B型	靠侧面传递扭矩。对中良好，装拆方便。导向平键是用螺钉固定在轴上，键与毂槽为动配合，轴上零件能做轴向移动，为了拆卸方便，设有起键螺钉	应用最广，对高精度、高速或承受变载、冲击的场合也适用 C型用在轴端联接。导向平键用于轴上零件轴向移动量不大的场合。薄型平键适用于薄壁结构和其他特殊用途的场合
半圆键	GB 1099—79 半圆键	靠侧面传递扭矩。键在轴槽中能绕槽底圆弧曲率中心摆动，装配方便	一般用于轻载，适用于轴为锥形的端部
楔键	普通楔键（GB 1564—79） 钩头楔键（GB 1565—79） 钩头楔键 1：100	键的上下两面是工作面，键的上表面和轮毂键槽底面均有1：100的斜度。装配后，键楔紧在轴毂之间。工作时，靠楔紧作用来传递扭矩，同时还可承受单向的轴向力。但在楔紧时破坏了轴与毂的对中性	用于精度要求不高和转速较低时传递较大的、双向的或有振动的扭矩 钩头的用于不能从另一端将键打出的场合，若用在轴端，应加保护罩
切向键	GB 1974—80 切向键　1：100	由一对斜度为1：100的楔键组成。拼合后上下两个相互平行的窄面为工作面。靠工作面上的挤压力和轴与毂间的摩擦力传递扭矩	用于载荷很大，对中要求不高的场合 有反转要求时，必须用互成120°～135°角的两个键
花键	矩形花键（GB 1144—74） D　d	齿的侧面是工作面。承载能力高，对中性好，轴与毂的强度削弱较少，导向性好 外径（D）、内径（d）和齿侧（即用齿厚b）三种定心方式	矩形花键应用广泛
	渐开线花键（GB 1104—72） d_i　d_f　D_e	渐开线花键可按齿形定心、与分度圆同心的圆柱面定心和外径定心	渐开线花键用于载荷较大，定心精度要求较高，以及尺寸较大的联接

5.2 键联接

5.2.1 键联接的类型

键是标准零件，主要用来联接轴和轴上的旋转零件或摆动零件，起周向固定作用，以传递扭矩。有些类型的键，还可以实现轴上的零件的轴向固定或轴向移动的导向装置。键的主要类型、特点和应用见表 1.1.2-28。

5.2.2 平键和花键联接的强度校核

因为键是标准件，所以设计键联接时，可根据联接的结构特点、使用要求和工作条件先选择键的类型，然后再根据轴径从标准中选出键的剖面尺寸，并按轮毂长度选出键的长度，最后按表 1.1.2-29～表 1.1.2-31 进行强度校核。

表 1.1.2-29 **平键和花键联接的强度校核**

键的类型		计算公式	符号意义
平键（包括半圆键）	静联接	挤压应力 $\sigma_p=\frac{2T}{dk\ell}\leq[\sigma]_p$ 剪切应力 $\tau=\frac{2T}{db\ell}\leq[\tau]$	T——传递的扭矩，N · mm d——轴的直径，mm k——键与轮毂的工作高度，mm b——键的宽度，mm
	动联接	压强 $p=\frac{2T}{dk\ell}\leq[p]$	ℓ——键的工作长度，mm $[\sigma]_p$——键联接的许用挤压应力，MPa（查表 1.1.2-30） $[\tau]$——键的许用剪切应力，MPa（查表 1.1.2-30） $[p]$——键联接的许用压强，MPa（查表 1.1.2-30）
花键	静联接	$\sigma_p=\frac{8T}{(D^2-d^2)Z\Psi\ell}\leq[\sigma]_p$	Z——花键的齿数 D——花键轴的外径，mm d——花键轴的内径，mm
	动联接	$p=\frac{8T}{(D^2-d^2)Z\Psi\ell}\leq[p]$	ℓ——花键齿的接触长度，mm Ψ——载荷分布不均系数，$\Psi=0.7\sim0.8$ $[\sigma]_p$——花键联接的许用挤压应力，MPa（查表 1.1.2-31） $[p]$——花键联接的许用压强，MPa（查表 1.1.2-31）

表 1.1.2-30 **平键联接的许用应力MPa**

许用应力	联接工作方式	键或轴、毂的材料	载荷性质		
			静载荷	轻微冲击	冲击
$[\sigma]_p$	静联接	锻钢、铸钢	120～150	100～120	60～90
		铸铁	70～80	50～60	30～45
$[p]$	动联接	锻钢、铸钢	50	40	30
$[\tau]$	静联接	锻钢（键）	120	90	60

注：1）键的材料采用抗拉强度不小于 600 MPa的钢，常用 45 号钢。

2）$[\sigma]_p$或$[p]$值要以联接中较弱零件的材料选取。

表 1.1.2-31 花键联接的许用应力MPa

许用应力	联接工作方式	工作条件	齿面未经热处理	齿面经过热处理
$[\sigma]_p$	静联接	不　良	35～50	40～70
		中　等	60～100	100～140
		良　好	80～120	120～200
$[p]$	动联接 (在空载下移动)	不　良	15～20	20～35
		中　等	20～30	30～60
		良　好	25～40	40～70
$[p]$	动联接 (在载荷下移动)	不　良	—	3～10
		中　等	—	5～15
		良　好	—	10～20

注：花键联接的零件多用抗拉强度不低于 600 MPa的钢制成。

5.3 销联接

销的主要用途是固定零件之间的相对位置，也可以用于轴与轮毂的联接或其他零件的联接，并传递不大的载荷。

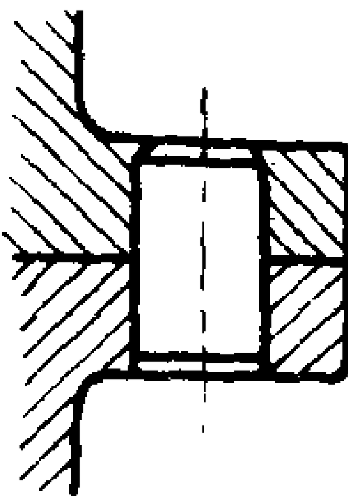


图 1.1.2-36 圆柱销

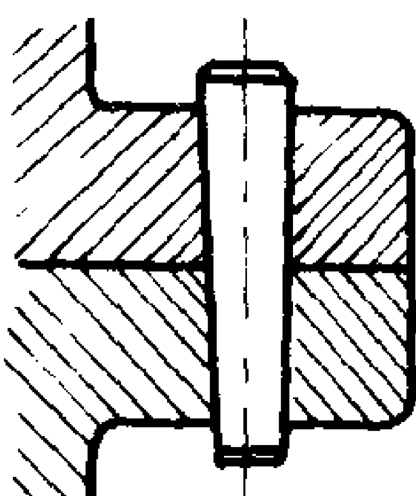


图 1.1.2-37 圆锥销

销的基本型式有圆柱销和圆锥销两种。圆柱销靠过盈配合固定在孔中（图 1.1.2-36)。这种销如经多次装拆，其定位精确度要降低，破坏联接的可靠性。圆锥销有 1∶50 的锥度(图 1.1.2-37)，安装比圆柱销方便，多次装拆对定位精确度影响较小。

圆柱销和圆锥销均有国家标准，其标准编号，圆柱销为GB 119—76，圆锥销为GB 117—76。设计销联接时，先从标准中选一型号，然后进行剪切和挤压的强度校核。销的常用材料为 35、45 号钢，其许用剪切应力$[\tau]=80$ MPa，许用挤压应力$[\sigma]_p$可查表 1.1.2-30。

6 带传动和链传动

6.1 带传动的类型

表 1.1.2-32 带传动的类型

类　型	剖　面　形　状	特　点　及　应　用
平型带		剖面为扁平矩形，结构最简单，带轮容易制造，用在中心距大的地方
三角带		剖面为梯形，在同样的张紧力下比平型带能产生更大的摩擦力，允许的传动比大，结构紧凑，应用最广

续上表

类型	剖面形状	特点及应用
圆型带		剖面为圆形，传力不大，多用在轻工业机械中
多楔带		是平型带和三角带的组合，兼有两者的优点，传动平稳，结构尺寸小
齿形带		带的内周制成齿形，与齿形的带轮啮合。该传动具有耐油、耐磨及抗老化等性能。一般使用在温度为－20～80℃的场合

6.2 三角胶带的标准规格

表 1.1.2-33　　三角胶带型号及剖面尺寸（按GB 1171—74）

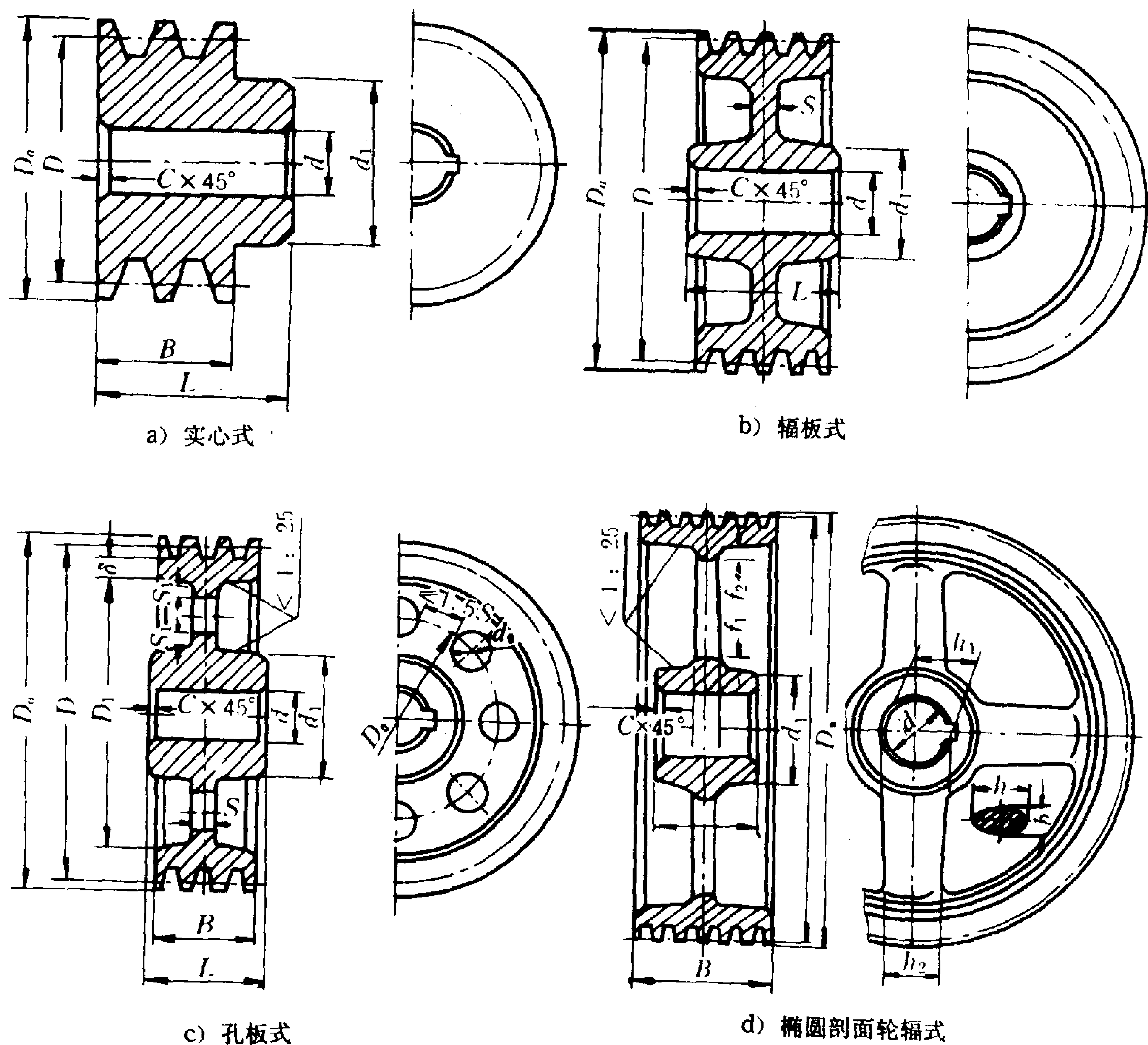
型号	剖面尺寸			剖面积	中性层尺寸		单位长度质量
	b	h	φ	A，mm²	h_a	b_p	q，kg/m
O	10	6	40°	47	2.1	8.5	0.0612
A	13	8		81	2.8	11	0.102
B	17	10.5		138	4.1	14	0.174
C	22	13.5		230	4.8	18.5	0.303
D	32	19		476	6.9	27	0.634
E	38	23.5		692	8.3	32	0.918
F	50	30		1170	11.0	42	1.55

表 1.1.2-34　　三角胶带的长度系列（内周长按GB 1171—74）

内周长度 L_i (mm)	节线长度 L (mm)						
	O	A	B	C	D	E	F
450	475						
500	525						
560	585	593					
630	655	663	670				
710	735	743	750				
800	825	833	840				
900	925	933	940				
1 000	1 025	1 033	1 040				
1 120	1 145	1 153	1 160				
1 250	1 275	1 283	1 290	1 305			
1 400	1 425	1 433	1 440	1 455			
1 600	1 625	1 633	1 640	1 655			
1 800	1 825	1 833	1 840	1 855			
2 000	2 025	2 033	2 040	2 055			
2 240		2 273	2 280	2 295			
2 500		2 533	2 540	2 555			
2 800		2 833	2 840	2 855			

续上表

内周长度 L_i (mm)	节线长度 L (mm)						
	O	A	B	C	D	E	F
3 150		3 183	3 190	3 205	3 226		
3 550		3 583	3 590	3 605	3 626		
4 000		4 033	4 040	4 055	4 076		
4 500			4 540	4 555	4 576	4 596	
5 000			5 040	5 055	5 076	5 096	
5 600			5 640	5 655	5 676	5 696	
6 300				6 355	6 376	6 396	6 419
7 100				7 155	7 176	7 196	7 219
8 000				8 055	8 076	8 096	8 119
9 000				9 055	9 076	9 096	9 119
10 000					10 076	10 096	10 119
11 200					11 276	11 296	11 319
12 500						12 596	12 619
14 000						14 096	14 119
16 000						16 096	16 119
标记示例	内周长度L_i=1250 mm B型三角胶带			三角胶带 B—1250 GB 1171—74			



a) 实心式

b) 辐板式

c) 孔板式

d) 椭圆剖面轮辐式

图 1.1.2-38 三角带带轮的结构

6.3 三角带轮

三角带轮主要采用铸铁制造，当圆周速度$v \leq 25$ m/s时，采用HT 15—33；$v=25 \sim 30$ m/s时，采用HT 20—40。当速度更高时，宜采用铸钢或用钢板冲压后焊接而成。若传递功率很小，可采用铝合金或工程塑料。三角带轮的最小直径及直径系列见表 1.1.2-35 和表 1.1.2-36。

表 1.1.2-35　　三角胶带带轮的最小直径D_{min}

型　号	O	A	B	C	D	E	F
D_{min}，mm	71（63）	100（90）	140（125）	200	315	500	800

表 1.1.2-36　　三角带轮的直径系列mm

63	67	71	75	80	90	95	100	106	112	118	125
132	140	150	160	170	180	200	212	224	236	250	265
280	300	315	355	375	400	425	450	475	500	530	560
600	630	670	710	750	800	900	1000	1060	1120	1250	1400
1500	1600	1800	1900	2000	2240	2500					

表 1.1.2-37　　三角带轮轮缘尺寸mm

轮槽剖面图	尺　寸			型　号						
				O	A	B	C	D	E	F
	h_a			2.5	3.5	5	6	8.5	10	12.5
	H_{min}			9.5	12	15	20	28	33	42
	e			12±0.3	15±0.3	19±0.4	25.5±0.5	37±0.6	44.5±0.7	58±0.8
	f			8	10	12.5	17	24	29	38
	δ_{min}			5.5	6	7.5	10	12	15	18
	B			$B=(Z-1)e+2f$　Z——轮槽数						
	φ	34°	D	63～80	90～112	125～180				
			b_0	10.0	13.1	17.1				
		36°	D				200～280	315～475	500～600	
			b_0				22.4	32.5	38.5	
		38°	D	≥90	≥125	≥200	≥300	≥500	≥630	≥800
			b_0	10.2	13.1	17.4	22.6	32.9	38.9	50.6

带轮由轮缘、轮辐和轮毂三部分组成。轮辐有实心（图 1.1.2-38 a）、辐板（图 1.1.2-38 b）、孔板（图 1.1.2-38 c）和椭圆剖面的轮辐（图 1.1.2-38 d）四种型式。设计时，主要根据带轮的直径来选择结构型式：当带轮直径$D \leq (2.5 \sim 3)d$（d为轴的直径，mm）时，可采用实心式；当$D \leq 300$ mm时，可采用辐板式；当$D-d \geq 100$ mm时，可采用孔板式；当$D>300$ mm时，可采用椭圆剖面的轮辐式。三角带轮轮缘尺寸见表 1.1.2-37，轮辐和轮毂尺寸见表 1.1.2-38。

表 1.1.2-38　　三角带轮轮辐和轮毂尺寸mm（见图 1.1.2-38）

尺寸	经验公式	尺寸	经验公式	尺寸	经验公式
d_1	（1.8～2）d，d为轴径	S	型号C　D　E	h_2	$0.8h_1$
D_0	$0.5(D_1+d_1)$		$S\geq 18$　22　28	b_1	$0.4h_1$
d_0	$(0.2\sim 0.3)(D_1-d_1)$	h_1	$\sqrt[3]{\frac{F\ D}{0.8Z_a}}$	b_2	$0.8b_1$
L	（1.5～2）d 当$B<1.5d$时，$L=B$		F——圆周力，N	f_1	$0.2h_1$
S	型号O　A　B		D——计算直径，mm	f_2	$0.2h_2$
	$S\geq 8$　10　14		Z_a——轮辐数	S_1	$\geq 0.5S$

6.4　三角胶带传动的设计

已知条件：（1）传递功率P，（2）主、从动轮的转速n_1、n_2（或传动比i），（3）传动的布置及工作条件。设计步骤及计算项目见表 1.1.2-39～表 1.1.2-45。

表 1.1.2-39　　三角胶带传动的设计计算

设计步骤及计算项目	单位	计算公式及参数选择	说　明
1）确定胶带型号		按P和n_1由图 1.1.2-39 选定	P——传递功率，kW n_1——小带轮转速，r/min
2）确定胶带内周长度L_i	mm		
（1）小带轮计算直径D_1	mm	参考表 1.1.2-35 和表 1.1.2-36 选定	为了提高胶带寿命，在尺寸允许下，尽量取较大直径
（2）大带轮计算直径D_2	mm	$D_2=\frac{n_1}{n_2}(1-\varepsilon)D_1$	ε——滑动率，一般取$\varepsilon=0.02$
（3）验算带速v	m/s	$v=\frac{\pi D_1 n_1}{60\times 1000}$ $5\ m/s\leq v\leq (25\sim 30)\ m/s$	$v=10\sim 15$ m/s时，最为经久耐用。若v不满足，可改变D_1
（4）初定中心距a_0	mm	$0.7(D_1+D_2)\leq a_0\leq 2(D_1+D_2)$	或按结构要求定出，但a_0须在左式范围内
（5）初算胶带节线长度L_0	mm	$L_0=2a_0+\frac{\pi}{2}(D_1+D_2)+\frac{(D_2-D_1)^2}{4a_0}$	由表 1.1.2-34 取相近的节线长度L和相应的标准L_i
（6）计算实际中心距a	mm	$a\approx a_0+\frac{L-L_0}{2}$ $0.7(D_1+D_2)\leq a\leq 2(D_1+D_2)$	为了安装调整和补偿张紧力，中心距a应能调整，调整范围 $a_{min}=a-0.015L$ $a_{max}=a+0.03L$
（7）验算小带轮包角α_1	o	$\alpha_1\approx 180^\circ-\frac{D_2-D_1}{a}\times 60^\circ\geq 120^\circ$	若α_1较小，可改变a，重新计算或采用张紧轮
3）计算胶带根数Z			
（1）定单根胶带传递功率P_0	kW	按胶带型号、带速v和小带轮计算直径D_1查表 1.1.2-40	P_0是在$\alpha_1=180^\circ$、特定长度和载荷平稳下的单根三角胶带功率
（2）单根胶带功率增量ΔP_0	kW	$\Delta P_0=K_b n_1\left(1-\frac{1}{K_i}\right)$	K_b——弯曲影响系数，查表 1.1.2-41 K_i——传动比系数，查表 1.1.2-42
（3）计算胶带根数Z		$Z=\frac{K_A P}{(P_0+\Delta P_0)K_a K_L}$若$Z$太多应改变型号或参数，重新计算	K_A——工作情况系数，查表 1.1.2-43 K_a——包角系数，查表 1.1.2-44 K_L——长度系数，查表 1.1.2-45

续上表

设计步骤及计算项目	单位	计算公式及参数选择	说　　明
4）计算单根胶带张紧力F_0	N	$F_0=500\frac{K_A P}{vZ}\left(\frac{2.5-K_a}{K_a}\right)+qv^2$	q——三角胶带每米长的质量，查表1.1.2-34
5）计算作用在轴上的力Q	N	$Q=2ZF_0\sin\frac{\alpha_1}{2}$	
6）设计带轮，并画带轮工作图（见本节6.3条）			

表1.1.2-40　　单根三角胶带所能传递的功率P_0

（$\alpha_1=\alpha_2=180°$，特定长度，载荷平稳；普通三角胶带）kW

型号	小带轮直径D_1 mm	胶带速度 V m/s															
		1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
O	(63)	0.10	0.17	0.29	0.40	0.51	0.59	0.64	0.70	0.74	0.77	0.77	0.77	0.72			
	71	0.11	0.19	0.33	0.47	0.58	0.68	0.76	0.84	0.90	0.95	0.97	0.98	0.95			
	80	0.11	0.21	0.37	0.52	0.65	0.77	0.86	0.96	1.04	1.10	1.15	1.18	1.17			
	≥90	0.12	0.23	0.40	0.56	0.71	0.85	0.95	1.07	1.16	1.24	1.30	1.34	1.35			
A	(90)	0.17	0.31	0.53	0.73	0.89	1.04	1.17	1.27	1.34	1.40	1.41	1.40	1.35			
	100	0.19	0.34	0.60	0.83	1.03	1.21	1.37	1.49	1.61	1.69	1.74	1.76	1.74			
	112	0.20	0.37	0.66	0.92	1.15	1.37	1.55	1.72	1.86	1.99	2.06	2.10	2.12			
	≥125	0.22	0.40	0.71	1.00	1.26	1.50	1.72	1.91	2.07	2.21	2.33	2.40	2.45			
B	(125)	0.29	0.51	0.89	1.20	1.47	1.71	1.91	2.00	2.16	2.24	2.24	2.20	2.09			
	140	0.32	0.58	1.01	1.40	1.73	2.03	2.30	2.51	2.68	2.82	2.90	2.91	2.87			
	160	0.35	0.65	1.15	1.60	2.00	2.37	2.70	2.99	3.23	3.42	3.57	3.66	3.69			
	≥180	0.38	0.70	1.25	1.76	2.21	2.64	3.02	3.35	3.65	3.90	4.10	4.24	4.32			
C	200		1.01	1.76	2.40	2.96	3.47	3.89	4.24	4.50	4.70	4.79	4.77	4.69			
	224		1.13	1.99	2.75	3.42	4.04	4.58	5.04	5.43	5.73	5.95	6.05	6.05			
	250		1.22	2.16	3.05	3.83	4.54	5.12	5.74	6.23	6.62	6.94	7.14	7.25			
	≥280		1.31	2.37	3.32	4.20	5.00	5.74	6.38	6.95	7.46	7.86	8.15	8.33			
D	315		2.03	3.50	4.76	5.84	6.80	7.57	8.23	8.70	9.0	9.14	9.02	8.71			
	355		2.30	4.05	5.57	6.94	8.01	9.24	10.1	10.9	11.5	11.8	12.0	12.0	11.8	11.2	
	400		2.54	4.52	6.29	7.89	9.37	10.7	11.8	12.8	13.6	14.3	14.7	14.9	14.9	14.6	14.0
	≥450		2.75	4.86	6.93	8.79	10.4	11.9	13.3	14.5	15.5	16.4	17.0	17.4	17.6	17.6	17.1
E	500				8.84	11.1	13.1	14.9	16.4	17.7	18.8	19.6	20.1	20.3	20.1	19.6	
	560				9.76	12.3	14.6	16.7	18.6	20.2	21.6	22.7	23.5	23.9	24.1	23.9	23.2
	630				10.6	13.4	16.1	18.4	20.6	22.5	24.1	25.5	26.6	27.3	27.8	27.8	27.5
	≥710				11.4	14.4	17.2	20.0	22.3	24.5	26.4	28.1	29.4	30.4	31.1	31.4	31.3
F	800				16.1	20.2	24.1	27.4	30.3	33.0	35.2	36.9	38.1	38.7	38.6	37.8	36.3
	900				17.6	22.3	26.6	30.4	33.9	37.1	39.8	42.0	43.7	44.8	45.2	45.0	44.3
	≥1000				18.8	23.9	28.6	32.8	36.6	40.4	43.5	46.0	48.2	49.7	50.5	50.8	50.4

注：若带的强力层为化学纤维绳芯结构时，表中数值可提高33%。

表1.1.2-41　　弯曲影响系数K_b

胶带型号	O	A	B	C	D	E	F
K_b	0.29×10^{-3}	0.77×10^{-3}	1.99×10^{-3}	5.63×10^{-3}	19.95×10^{-3}	37.35×10^{-3}	96.10×10^{-3}

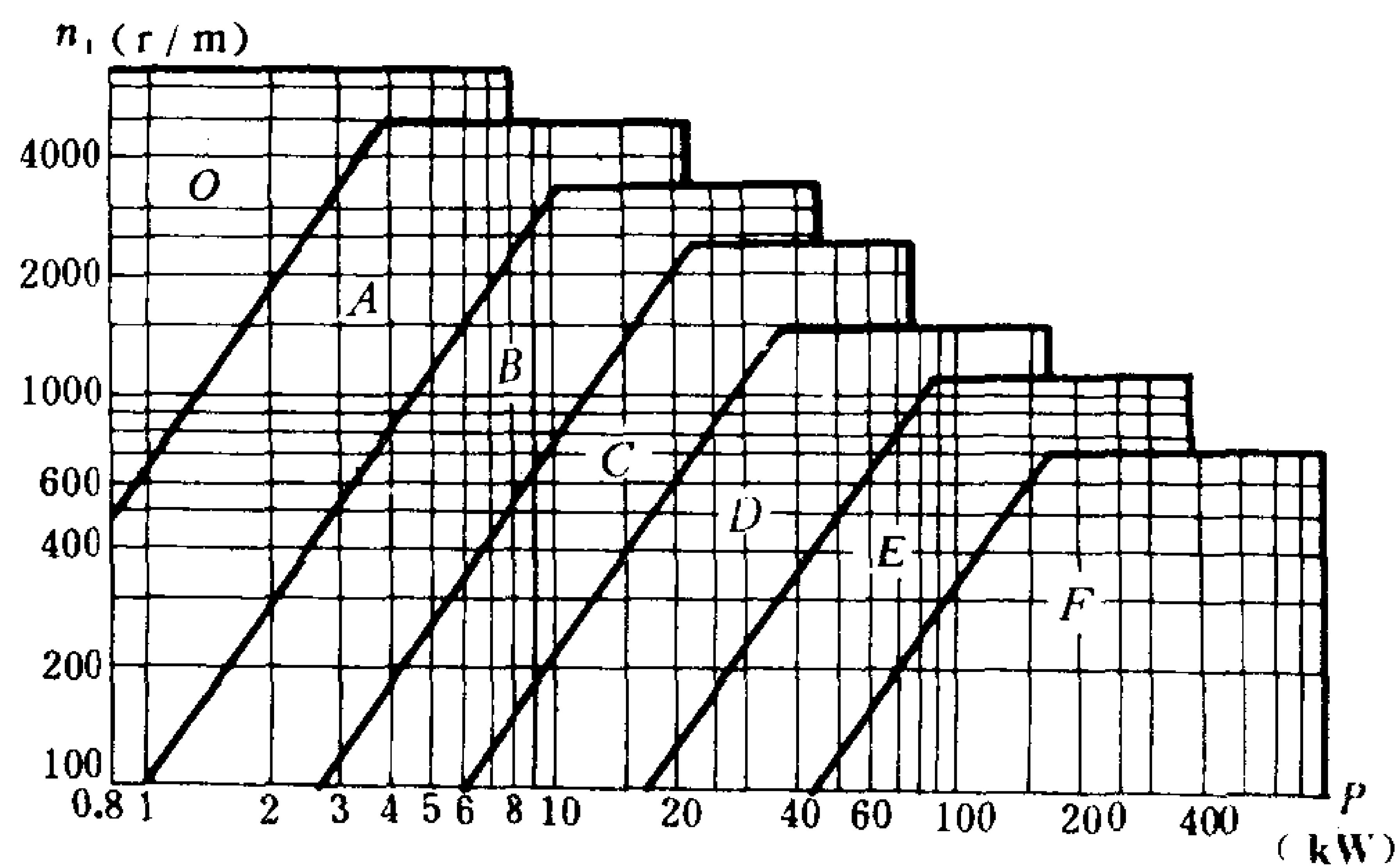


图 1.1.2-39 三角胶带型号选择

表 1.1.2-42 **传动比系数K_i**

传动比i	1～1.04	1.05～1.19	1.20～1.49	1.50～2.95	>2.95
K_i	1	1.03	1.08	1.12	1.14

表 1.1.2-43 **工作情况系数K_A**

工作机载荷性质	原动机					
	直流电动机、鼠笼型交流异步电动机、汽轮机、水轮机			交流同步电动机、交流异步滑环电动机、内燃机、蒸汽机		
	一天工作时数，h					
	≤10	10～16	>16	≤10	10～16	>16
工作平稳	1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
载荷变动小	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
载荷变动较大	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
冲击载荷	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

表 1.1.2-44 **包 角 系 数 K_a**

包角α_1	180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	90°
K_a	1.00	0.98	0.95	0.92	0.89	0.86	0.82	0.78	0.74	0.69

表 1.1.2-45 **长 度 系 数 K_L**

内周长度 L_i, mm	K_L O	K_L A	K_L B	K_L C	内周长度 L_i, mm	K_L A	K_L B	K_L C	K_L D	K_L E	K_L F
450	0.89				2800	1.11	1.05	0.95			
500	0.91				3150	1.13	1.07	0.97	0.86		
560	0.94	0.80			3550	1.17	1.10	0.98	0.89		
630	0.96	0.81	0.78		4000	1.19	1.13	1.02	0.91		
710	0.99	0.82	0.79		4500		1.15	1.04	0.93	0.90	

续上表

内周长度 L_i, mm	K_L				内周长度 L_i, mm	K_L					
	O	A	B	C		A	B	C	D	E	F
800	1.00	0.85	0.80		5000		1.18	1.07	0.96	0.92	
900	1.03	0.87	0.81		5600		1.20	1.09	0.98	0.95	
1000	1.06	0.89	0.84		6300			1.12	1.00	0.97	0.91
1120	1.08	0.91	0.86		7100			1.15	1.03	1.00	0.94
1250	1.11	0.93	0.88	0.80	8000			1.18	1.06	1.02	0.97
1400	1.14	0.96	0.90	0.81	9000			1.22	1.08	1.05	1.00
1600	1.16	0.99	0.93	0.84	10000				1.11	1.07	1.03
1800	1.18	1.01	0.95	0.85	11200				1.14	1.10	1.06
2000	1.20	1.03	0.98	0.88	11500					1.12	1.09
2240		1.06	1.00	0.91	14000					1.15	1.13
2500		1.09	1.03	0.93	16000					1.18	1.16

6.5 同步齿形带的结构和规格

同步齿形带是以钢丝绳或玻璃纤维绳为强力层，外面复以聚氨酯或氯丁橡胶，带的内周制成齿形，使其与齿形带轮啮合(图 1.1.2-40)。由于强力层承载后变形小，能保持齿形带的周节不变，故带与带轮间没有相对滑动，从而保证了同步传动，传动比恒定。

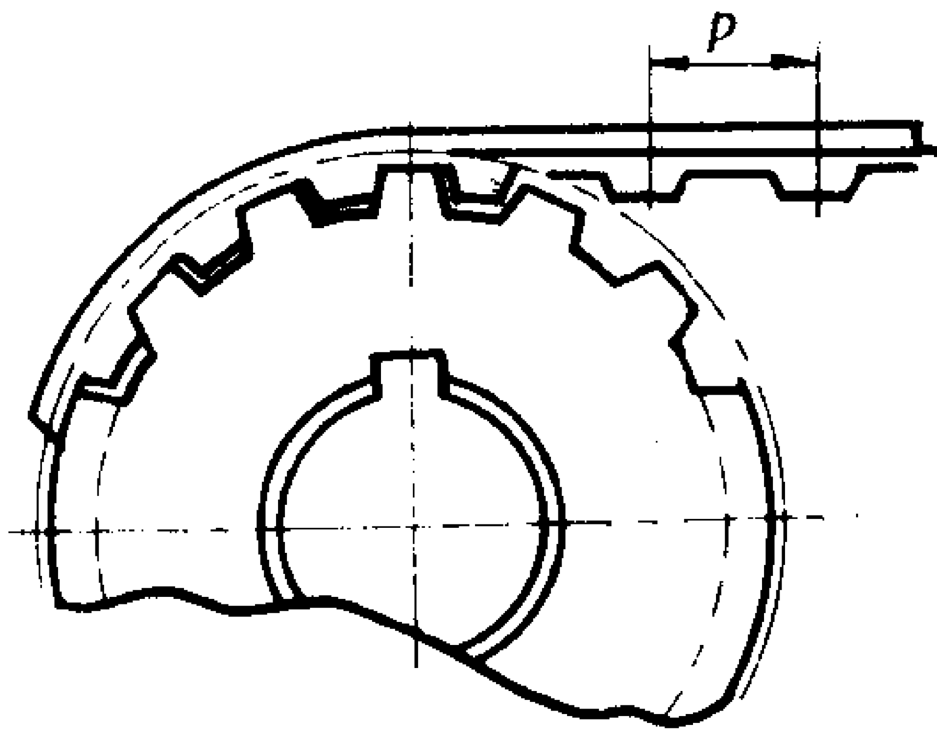


图 1.1.2-40　同步齿形带传动

表 1.1.2-46　　同步齿形带的模数、宽度和齿数系列及规格

宽度系列, mm	8、 10、 12、 16、 20、 25、 32、 40、 50、 60、 80、 100、 120							
齿数系列	32、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、100、110、120、140、160、180、200							
模数 m 系列, mm	1.5	2	2.5	3	4	5	7	10
宽度 b	8～32	10～50	12～60		16～80	20～80	25～100	40～120
齿数 Z	32～200		35～200		40～200		45～200	50～200
标记示例	模数 $m=4$ mm、宽度 $b=60$ mm、齿数 $Z=100$ 的聚氨酯同步带： 聚氨酯同步带　4×60×100							

同步齿形带以强力层的中心线为节线，节线周长度 L_p 为公称长度，相邻两齿沿节线对应点间的距离称为周节 p，模数 $m=p/\pi$。国产同步齿形带采用模数制。带的标记为：模数(mm)×宽度(mm)×齿数，即 $m\times b\times z$。其模数、宽度和齿数的系列以及三者之间的相应

规格见表 1.1.2-46。

6.6 链传动的特点和应用

特点　链传动是带有中间挠性件的啮合传动。与带传动相比，它的主要优点是：1)无弹性滑动和打滑现象，因而平均传动比不变；2)不需要很大的张紧力，所以作用在轴上的载荷小；3) 相同的使用条件下，尺寸较紧凑；4) 效率较高，$\eta \approx 98\%$；5) 能在温度较高、湿度较大的环境中使用。它的主要缺点是：1) 只能用于平行轴间的传动；2) 瞬时传动比不恒定，高速运转不如带传动平稳；3)工作时有噪声，不宜在载荷变化很大和急速反转的传动中应用。

应用范围　目前，链传动所能传递的功率可达 3,600 kW，最高速度可达 40 m/s，最大传动比可达 15，最大中心距可达 8 m。但在工业中常用的传动链，其传递功率一般小于 100 kW，速度一般不超过 15 m/s，传动比 $i_{max} \leq 8$。

6.7 传动链的类型和结构特点

表 1.1.2-47　　传动链的类型和结构特点

类　型	简图与标准编号	结　构　特　点
套筒滚子链	GB 1243—76	由内链板 1、外链板 2、销轴 3、套筒 4 和滚子 5 等构成。销轴与外链板、套筒与内链板分别用过盈配合固联。滚子与套筒、套筒与销轴之间为间隙配合。当链条绕上链轮时，内、外链节相对挠曲，套筒可在销轴上自由转动，而滚子沿链轮齿廓滚动，减轻磨损
齿形链	JB 1839—76	由一组带有两个齿的链片左右交错并列铰接而成。工作时，通过链片上的链齿与链轮轮齿相啮合来实现传动。齿形链上设有导片，以防止链条在工作中的轴向窜动。导片有内导片和外导片两种(左图为外导片)。用内导片齿形链时，链轮轮齿上应开出导向槽

6.8 套筒滚子链的标准规格

表 1.1.2-48　　套筒滚子链的规格、主要尺寸和破坏载荷（GB 1243—76）

链号	链节距 p mm	滚子直径 d_{rmax} mm	销轴直径 d_{omax} mm	内链板间距 c_{min} mm	链板厚度 s mm	多列链列距 p_i mm	每米质量 q kg/m	单列链破坏载荷 Q_B，kN	
								B级	A级
TG095	9.525	6.35	3.30	5.72	1.30	10.24	0.4	9	
TG127	12.70	8.51	4.55	7.75	1.50	13.92	0.7	18	
TG158	15.875	10.16	5.08	9.53	2.10	18.11	1.3	22	
TG190	19.05	11.91	5.95	12.70	2.40	22.78	1.6	32	
TG254	25.40	15.88	7.94	15.88	3.23	29.29	2.6	50	58
TG317	31.75	19.06	9.52	19.05	4.02	35.76	3.9	80	90
TG381	38.10	22.23	11.10	25.40	4.82	45.44	5.6	120	135
TG444	44.45	25.40	12.70	25.40	5.65	48.87	7.5	160	180
TG508	50.80	28.58	14.30	31.75	6.50	58.55	10	185	227
TG635	63.50	39.68	19.84	38.10	8.10	71.55	18	320	380

注：1）A级用于重载、高速和重要的传动；B级用于一般传动。

2）套筒滚子链的标记为：TG×××（链号）　等级（B级不标）×列数（单列不标）—链节数　GB1243-76（国标号）

6.9 套筒滚子链链轮

链轮齿形已经标准化。凡按标准齿形设计的链轮，其端面齿形在工作图上不必画出，只须在图上列表注明节距p、滚子外径d_r、齿数Z、节圆直径d、齿顶圆直径d_a和齿根圆直径d_f（或最大齿根距离L_x），并注明“齿形按GB1244—76制造”即可。所以，链轮设计主要是确定其结构及尺寸，选择材料及其齿面硬度。其主要尺寸及常用材料见表 1.1.2-49 和表 1.1.2-50。

表 1.1.2-49　　套筒滚子链链轮主要尺寸（GB1244—76）

名　　称	符号	计 算 公 式
节圆直径	d'	$d'=\frac{p}{\sin(180°/z)}$
齿顶圆直径	d_a	$d_a=p(0.54+\text{ctg}\,180°/z)$
齿根圆直径	d_f	$d_f=d'-d_r$　d_r—滚子直径
最大齿根距离	L_x	$L_x=d_f$（偶数齿） $L_x=d'\cos(90°/z)-d_r$（奇数齿）
齿侧凸缘最大直径或列间槽最大直径	d_h	$d_h=p(\text{ctg}\frac{180°}{z}-1)-0.80$

注：d_a、d_h值取整数，其他尺寸精确到 0.01 mm。

表 1.1.2-50 链轮常用的材料和齿面硬度

材　　料	齿 面 硬 度	应 用 范 围
15、20	HRC 50～60	$Z\leqslant25$，有冲击载荷的主、从动链轮
35	HB 160～200	在正常工作条件下，$Z>25$ 的链轮
40、50、ZG 45	HRC 40～50	无剧烈冲击、振动；在易磨损条件下工作的链轮
15 Cr、20 Cr	HRC 50～60	$Z<25$，在动载荷及传递较大功率的重要链轮
35 SiMn、40 Cr、35 CrMo	HRC 40～50	采用A级链条，重要的链轮
A 3、A 5	HB 140	中等速度、传递中等功率的链轮
不低于HT 15-33 的灰铸铁	HB 260～280	$Z_2>50$ 的从动链轮

6.10 套筒滚子链传动的设计

已知条件：(1) 传递功率P，(2) 主、从动链轮的转速n_1、n_2（或传动比i），(3) 载荷情况及工作机和原动机的种类。计算步骤见表 1.1.2-51～表 1.1.2-53。

表 1.1.2-51 $v\geqslant0.6$ m/s时套筒滚子链传动的设计计算

设计步骤及计算项目	计算公式及参数选择	说　　明
(一) 确定链轮齿数 Z_1和Z_2	当链速$v=0.6\sim8$ m/s，$Z_1\geqslant17\sim19$ $v>8$ m/s，$Z_1\geqslant19\sim23$ $Z_2=iZ_1$	链轮齿数应优先选择以下数列：17，19，21，23，25，38，57，76，95，114
(二) 定链节距、求链节数 (1) 选链节距$p$mm (2) 确定许用功率P_0kW及润滑方式 (3) 初定中心距$a_0$mm (4) 计算列数系数K_p (5) 确定链列数Z_p	按GB 1243-76 表 1.1.2-48 初选一节距 按n_1和p从图 1.1.2-41 查得 一般取$a_0=(30\sim50)\,p$ $K_p=\dfrac{K_p}{K_ZK_i\cdot K_aP_0}$ 式中：K—载荷系数，查表 1.1.2-52 K_Z—齿数系数，K_i—传动比系数，K_a—中心距系数，查表 1.1.2-53 按K_p从表 1.1.2-53 查得	设计时，也可以自定Z_p，然后算出P_0，再从图 1.1.2-41 查得p及润滑方式 为了使结构紧凑、寿命长，尽可能选用较小节距单列链，当速度高功率大时，则可选用小节距多列链 若求出的Z_p太多时，可取大一号的p重新计算
(三) 求链节数L_p	$L_p=\dfrac{2a_0}{p}+\dfrac{Z_1+Z_2}{2}+\dfrac{p}{a_0}\times\left(\dfrac{Z_2-Z_1}{2\pi}\right)^2$	取整偶数
(四) 求计算中心距a mm	$a=\dfrac{p}{4}\left[\left(L_p-\dfrac{Z_1+Z_2}{2}\right)+\sqrt{\left(L_p-\dfrac{Z_1+Z_2}{2}\right)^2-8\left(\dfrac{Z_2-Z_1}{2\pi}\right)^2}\right]$	实际安装中心距要比计算中心距小 2～5 mm

对于$v<0.6$ m/s的低速链，一般按静强度计算。即静强度安全系数

$$S=\frac{K_pQ_B}{KF}\geqslant4\sim8$$

式中：Q_B——单列链破坏载荷（查表 1.1.2-48），N；

F——有效圆周力，N。其他符号见表 1.1.2-51。

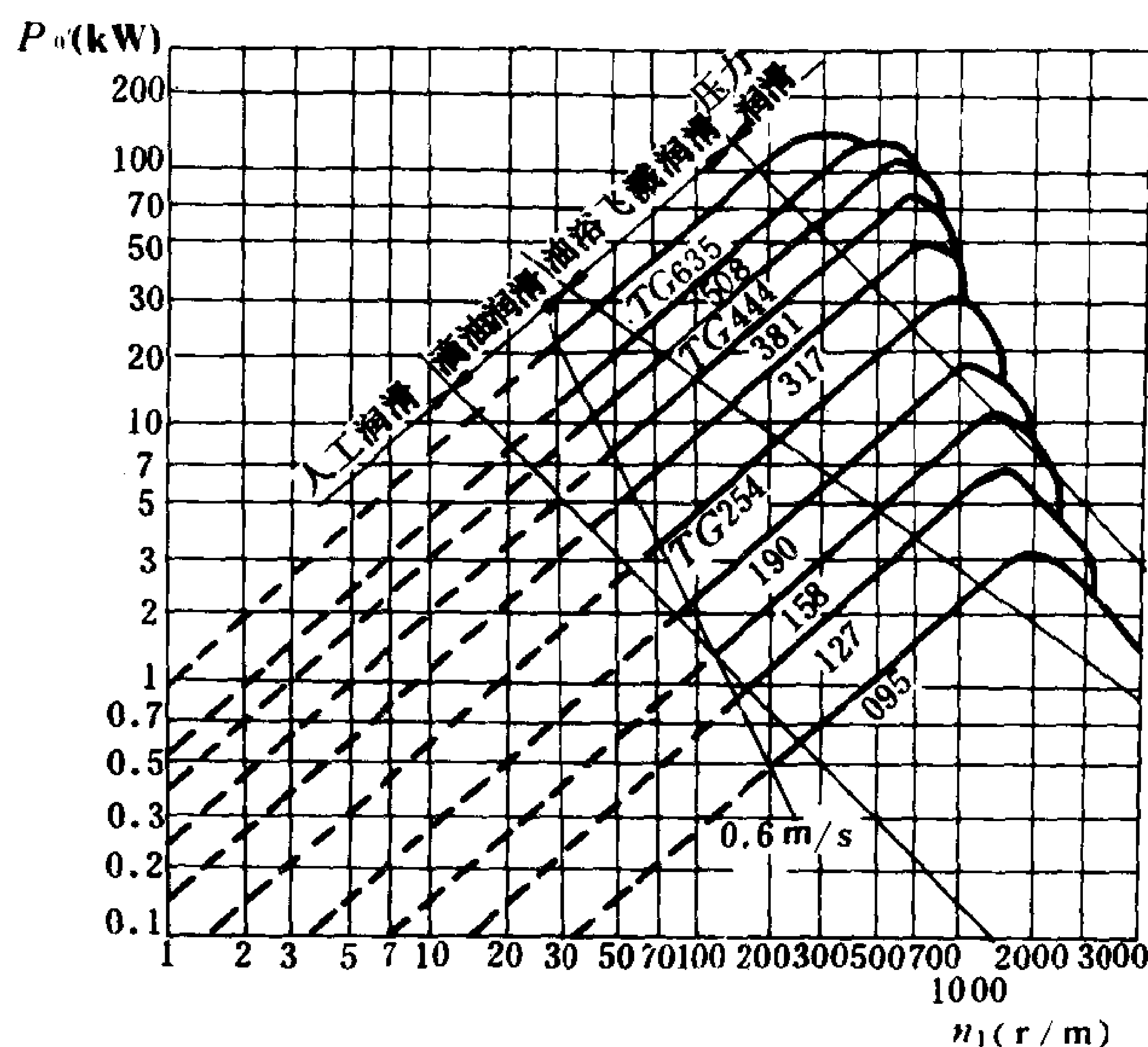


图 1.1.2-41 套筒滚子链传动许用功率曲线图

表 1.1.2-52 链传动载荷系数K

载荷情况	工 作 机 种 类	原动机种类		
		电动机 汽轮机	内燃机：带流体机构	内燃机：无流体机构
平稳传动	载荷平稳的皮带输送机，链式输送机，离心泵，离心鼓风机，载荷无变化的一般机械	1.0	1.0	1.2
稍有冲击的传动	离心压缩机，船舶推进机，压气机，自动炉，干燥机，一般工程机械，一般机床，粉碎机	1.3	1.2	1.4
有大冲击的传动	冲床，碎石机，矿山机械，振动机械，石油钻机，轧辊，输送辊道，带反转或有冲击的一般机械	1.5	1.4	1.7

表 1.1.2-53 K_z、K_i、K_a、K_p的值

Z_1	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37
K_z	0.45	0.56	0.67	0.78	0.89	1.00	1.12	1.23	1.35	1.46	1.58	1.70	1.81	1.94	2.12

i	1	2	3	5	≥7
K_i	0.82	0.93	1.00	1.09	1.15

a	20p	40p	80p	160p
K_a	0.87	1.00	1.18	1.45

Z_p	1	2	3	4	5
K_p	1	1.7	2.5	3.3	4.1

7 轴

7.1 轴的用途和分类

轴是组成机器的一个重要零件，一切作回转运动的零件都要装在轴上才能实现其回转运动。常见的轴有直轴和曲轴两种，本节只讨论直轴。

轴按其受载荷性质的不同，可分为如下三类，见表 1.1.2-54。

表 1.1.2-54　　　　　　　　轴的类型（按受载荷性质分）

类型		特征	图例
转轴		工作时既承受弯矩又传递扭矩	减速器中的轴 转轴
心轴	转动的	用来支承传动零件，只承受弯矩而不传递扭矩	铁路车辆轴（转动的）支承滑轮的轴（不转动的） 转动心轴 不移动心轴
	不转动的		
传动轴		主要用来传递扭矩而不承受弯矩或弯矩很小	船舶尾轴前面的中间轴 低速柴油机 传动轴

轴根据外形的不同，可分为光轴和阶梯轴。前者加工容易，应力集中源少，但轴上的零件装配和定位困难；后者正相反。因此，光轴主要用于传动轴，阶梯轴则用于转轴。

7.2　轴的材料

轴的材料主要采用碳素钢和合金钢。碳素钢比合金钢价廉，对应力集中的敏感性较小，所以应用较广泛。

常用的碳素钢有 30、40、45 和 50 号钢。其中最常用的是 45 号钢，为保证其机械性能，应进行调质或正火处理。不重要的或受力较小的轴可以使用A 3、A 4 或A 5 等普通碳素钢。

合金钢具有较高的机械强度，可淬性也较好，可以在传递大功率并要求减小尺寸与重量和提高轴颈耐磨性时采用。例如采用滑动轴承的高速轴，常用 20 Cr、20 CrMnTi等低碳合金钢，轴颈经渗碳淬火后，可提高其耐磨性；汽轮发电机转子轴在高温、高速和重载条件下工

作，必须具有良好的高温机械性能，常采用 38 GrMoAlA合金结构钢。

必须指出：在一般工作温度下（低于 200℃），各种碳钢和合金钢的弹性模量均相差不多，因此在选择钢的种类和决定钢的热处理方法时，所根据的是强度和耐磨性，而不是轴的弯曲或扭转刚度。至于要提高轴的刚度，可适当增大轴的剖面积来达到。

近年来，高强度铸铁和球墨铸铁铸造成型轴有了进展，它们容易作成复杂的形状，且具有价廉、良好的吸振性和耐磨性，以及对应力集中的敏感性较低等优点，可用于制造外形复杂的轴，如曲轴。

表 1.1.2-55 中例出了轴的常用材料及其机械性能。

表 1.1.2-55　　轴的常用材料及其机械性能

材料牌号	热处理	毛坯直径 mm	硬度 HB	σ_B	σ_S	σ_{-1}	τ_{-1}	备　注
				MPa				
A 3		≤40		432	235	180	104	用于不重要或载荷不大的轴
A 5		任意	190	520	280	220	130	
45	正火	25	≤241	610	360	260	150	应用最广泛
	正火	≤100	170～217	600	300	275	140	
	回火	>100～300	162～217	580	290	270	135	
	调质	≤200	217～255	650	360	300	155	
40 Cr	调质	25		1000	800	500	280	用于载荷较大而无很大冲击的重要轴
		≤100	241～286	750	550	350	200	
		>100～300	229～269	700	500	340	185	
40 CrNi	调质	25	300～320	1000	800	485	280	用于很重要的轴
		≤100	270～300	900	750	450	260	
38 CrMoAlA	氮化	30	229	1000	850	495	285	用于要求高耐磨性、高强度，且热处理变形小的轴
20 Cr	渗碳 淬火 回火	15	表面 HRC 56～62	850	550	375	215	用于要求强度、韧性均较高的轴（如齿轮、蜗轮轴）
		30		650	400	280	160	
		≤60		650	400	280	160	
20 CrMnTi	渗碳 淬火 回火	15	表面 HRC 56～62	1100	850	525	300	
QT 40—10			156～179	400	300	145	125	
QT 45—5			170～207	450	330	160	140	
QT 60—2			197～269	600	420	215	185	

7.3 轴的最小直径

7.3.1 最小轴径

按中华人民共和国船舶检验局“钢质海船入级与建造规范”（1986 年）规定，轴直径d应不小于表 1.1.2-56 中所计算的值。

表 1.1.2-56　　　　　　　　　　轴 径 规 范

最小轴径	$d=100C\sqrt[3]{\frac{P_e}{n_e}}\ (\frac{608}{\sigma_B+176.5})$ mm
说明	P_e——轴传递的额定功率，kW n_e——轴传递P_e时的转速，r/min σ_B——轴材料的标定抗拉强度的下限值，MPa $C=1$——中间轴的直轴部分、齿轮轴和蜗轮轴 $C=1.1$——推力轴在推力环处向外等于一个推力轴直径的部分，其余部分可按圆锥减小到中间轴直径 $C=1$——扭力轴，但式中的$\frac{608}{\sigma_B+176.5}$用$\frac{430}{\sigma_B}$代替 $C=1.09$——尾轴不与海水接触部分 $C=1.22$——对于油润滑的且具有认可型油封装置的，或装有连续轴套（或轴承之间包有适当保护层）的油压无键套合或法兰联接的螺旋桨轴 $C=1.27$——同上述情况一样，但具有键的螺旋桨轴 $C=1.05$——尾尖舱隔舱壁前的尾轴和螺旋桨轴的直径可按圆锥减小，而在联轴器法兰处的最小轴径

7.3.2 轴径的修正

表 1.1.2-57　　　　　　　　　　轴 径 修 正 规 范

轴 的 结 构	轴 径 修 正
轴的中空直径d_o大于 0.4d时	$d_c=d\sqrt[3]{\frac{1}{1-\left(\frac{d_o}{d}\right)^4}}$ mm d_c——修正后轴的直径 d——按表 1.1.2-56 计算的轴直径
轴上有一个键槽时	至少在整个键槽长度范围内轴的直径增加 5%
轴上有一径向孔时	至少在 7 倍孔直径的长度范围内的轴直径应增加 18%。但径向孔的直径应不大于增大后轴直径的 20%，孔的边角应磨光滑
轴上有一长槽时	至少在槽两端延伸到轴直径的 25%的整个长度范围内的轴直径应不小于下式计算的值 $d_c=1.2d+0.114\ (1.5\ \ell+b)$　mm l——槽的长度，mm b——槽的宽度，mm；且b应满足 $0.1d<b<0.25d$。槽的边缘应做成半圆形，圆角半径应不小于 0.35 b，且表面应磨光滑

对仅在港区航行的船舶的轴系直径，可减少 25%。

7.4 轴的强度验算

轴的设计通常以最小轴径为依据，然后按轴上零件的装配方案、轴上零件的轴向与周向定位和轴的结构工艺性等条件，初步完成轴的结构设计。此时，轴的各部分尺寸已初步确定，因此，只要对各危险剖面进行强度验算。

进行轴的强度验算时，应根据轴的具体受载及应力情况，采用相应的计算方法，并恰当地选取许用应力。对于仅（或主要）用于传递扭矩的轴（传动轴），应按扭转强度条件验算；对于只承受弯矩的轴（心轴），应按弯曲强度条件验算；对于既传递扭矩又承受弯矩的轴（转轴），应按弯扭合成应力校核轴的强度。对于一般用途的轴，按上述方法验算即可。对于重要的轴，还应按疲劳强度条件进行精确校核（安全系数法）。对于瞬时过载很大的轴，还应按尖峰载荷校核其静强度。轴的疲劳强度和尖峰载荷的静强度校核可参阅有关参考书，本节只对扭转

强度和弯扭合成强度进行讨论. 至于弯曲强度验算，只要将弯扭合成强度中的扭矩去掉即可。

7.4.1 按扭转强度条件验算

表 1.1.2-58 **扭转强度验算**

验算公式	$\tau_T=\dfrac{T}{W_T}=\dfrac{9550000P/n}{W_T}\leq[\tau]_T$ MPa
说明	τ_T——扭转剪应力　　T——轴传递的扭矩，N·mm P——轴传递的功率，kW　　W_T——轴的抗扭剖面模量，mm³（查表 1.1.2-60） n——轴的转速，r/min　　$[\tau]_T$——许用扭转剪应力，MPa 轴常用的几种材料的$[\tau]_T$值

轴的材料	A3，20	A5，35	45	40Cr，20CrMnTi，35SiMn，38SiMnMo
$[\tau]_T$MPa	12～20	20～30	30～40	40～52

注：当作用在轴上的弯矩比扭矩小或只受扭矩时，$[\tau]_T$取较大值，反之取较小值

7.4.2 按弯扭合成强度条件验算

表 1.1.2-59 **弯扭合成强度验算**

验算步骤	计算简图
1）作出轴的计算简图（即力学模型） 在作计算简图时，把轴当作置于铰链支座上的梁，轴上零件传来的力通常当作集中力来考虑，其作用点取为零件轮缘宽度的中点，并将载荷分解到轴的水平面和垂直面上，如右图a)所示。支反力的位置，对向心滚动轴承，可认为支反力作用在轴承宽度的中间；对向心推力滚动轴承，可认为支反力作用在距轴承端面a处（a可查滚动轴承手册）；对滑动轴承，可认为支反力作用在距轴承内端面 0.5d处（d为轴颈直径），但不应小于轴承长度的25～35%。然后求出水平面的反力R_H和垂直面的反力R_V 2）作出弯矩图 根据上述简图，分别按轴的水平面和垂直面计算各力产生的弯矩，并按计算结果分别作出水平面上的弯矩M_H图（右图b）和垂直面上的弯矩M_V图（右图c）。然后按下式作出总弯矩M图（右图d） $M=\sqrt{M_H^2+M_V^2}$ 3）作出扭矩图 扭矩则从轮毂宽度的中点算起。为了使扭矩图符合下述强度计算公式，把扭矩T折算为αT（右图e）α的含义见下条 4）作出计算弯矩图 根据上述求出的总弯矩图和扭矩图，按第三强度理论求出计算弯矩M_{ca}图（右图f），M_{ca}的计算公式为 $M_{ca}=\sqrt{M^2+(\alpha T)^2}$ 式中α是考虑扭矩和弯矩的作用性质差异系数。对不变的扭矩，$\alpha\approx0.3$；当扭矩脉动变化时，$\alpha\approx0.6$；对于频繁正反转的轴，τ_T可看成对称循环变应力，取$\alpha=1$ 5）校核轴的强度 对某些危险剖面（即计算弯矩大而直径小的剖面）作如下的强度校核，即 $\sigma_{ca}=\dfrac{M_{ca}}{W}=\dfrac{\sqrt{M^2+(\alpha T)^2}}{W}\leq[\sigma_{-1}]_b$ 式中：W——轴的抗弯剖面模量，查表 1.1.2-60 $[\sigma_{-1}]_b$——轴在对称循环变应力状态下的许用弯曲应力，若是固定心轴，则应根据轴上的应力状态来选取相应的许用弯曲应力，见表 1.1.2-61	

表 1.1.2-60　　**抗弯和抗扭剖面模量计算公式**

剖面	W	W_T	剖面	W	W_T
(实心圆)	$\frac{\pi d^3}{32}\approx 0.1d^3$	$\frac{\pi d^3}{16}\approx 0.2d^3$	(双键槽)	$\frac{\pi d^3}{32}-\frac{bt(d-t)^2}{d}$	$\frac{\pi d^3}{16}-\frac{bt(d-t)^2}{d}$
(空心圆)	$\frac{\pi d^3}{32}(1-\beta^4)$ $\approx 0.1d^3(1-\beta^4)$ $\beta=\frac{d_1}{d}$	$\frac{\pi d^3}{16}(1-\beta^4)$ $\approx 0.2d^3(1-\beta^4)$ $\beta=\frac{d_1}{d}$	(横孔)	$\frac{\pi d^3}{32}(1-1.54\frac{d_1}{d})$	$\frac{\pi d^3}{16}(1-\frac{d_1}{d})$
(单键槽)	$\frac{\pi d^3}{32}-\frac{bt(d-t)^2}{2d}$	$\frac{\pi d^3}{16}-\frac{bt(d-t)^2}{2d}$	(花键)	$\left[\pi d^4+(D-d)(D+d)^2 Zb\right]/32D$ Z——花键齿数	$\left[\pi d^4+(D-d)(D+d)^2 Zb\right]/16D$ Z——花键齿数

表 1.1.2-61　　**转轴和心轴的许用弯曲应力MPa**

材料	强度极限σ_B	静应力下$[\sigma_{+1}]_b$	脉动循环应力下$[\sigma_0]_b$	对称循环应力下$[\sigma_{-1}]_b$
碳钢	400	130	70	40
	500	170	75	45
	600	200	95	55
	700	230	110	65
合金钢	800	270	130	75
	1000	330	150	90

7.5 轴的刚度验算

轴受载荷后要发生弯曲和扭转变形，如果变形过大，会影响轴上零件正常工作。所以对有刚度要求的轴，除强度验算外，还必须进行刚度校核验算。

轴的刚度分为弯曲刚度和扭转刚度两种。前者以挠度或偏转角度量；后者以扭转角度量。

7.5.1 轴的弯曲刚度校核计算

通常按材料力学中的公式和方法算出轴的挠度y和偏转角θ，使得$y\leq[y]$，$\theta\leq[\theta]$。

一般转轴的许可挠度$[y]=(0.0001\sim0.0005)L$，L为转轴支承点间的跨距。对于齿轮轴，常取$[y]=(0.01\sim0.03)$ m，m为齿轮模数。

装齿轮轴头处的许可偏转角$[\theta]=(0.001\sim0.002)$ rad。装滚动轴承（G级精度）的轴径处的许可偏转角取为：圆柱滚子轴承，$[\theta]\leq0.0025$ rad；圆锥滚子轴承，$[\theta]\leq0.0016$ rad；单列球轴承，$[\theta]\leq0.005$ rad；球面（调心）球轴承，$[\theta]\leq0.05$ rad。

7.5.2 轴的扭转刚度校核计算

同样按材料力学的公式和方法算出轴每米长的扭转角φ_0，使得$\varphi_0\leq[\varphi_0]$，此处$\left[\varphi_0\right]$为轴每米长的允许扭转角，对于一般传动，可取$[\varphi_0]=0.5\sim1^\circ/\text{m}$；对于精确传动，可取$[\varphi_0]=0.25\sim0.5^\circ/\text{m}$；对刚度要求不严的轴，$[\varphi_0]$可大于$1^\circ/\text{m}$。

7.6 轴的临界转速

轴的转速达到一定值时，运转便不稳定而发生显著的反复变形，这现象称为轴的振动。如果继续提高转速，振动就会衰减，运转又趋于平稳，但是当转速达到另一较高的定值时，振动又复出现。使轴发生显著反复变形的转速，称为轴的**临界转速**。同型振动的临界转速有好几个，最低的一个称为第一阶临界转速。轴的工作转速不能和其临界转速重合或接近，否则将发生共振现象而使轴遭到破坏。计算临界转速的目的就在于使工作转速n避开轴的临界转速n_c。

工作转速n低于第一阶临界转速n_{c1}的轴，称为刚性轴，超过第一阶临界转速的轴，称为挠性轴。对于刚性轴，要使$n\leq(0.75\sim0.8)n_{c1}$；对于挠性轴，使$1.4n_{c1}\leq n\leq0.7n_{c2}$；$n_{c1}$和$n_{c2}$分别为轴的第一阶和第二阶的临界转速，其值可按力学及有关资料计算求得，或由实测确定。

8 滑动轴承

8.1 滑动轴承的主要结构型式

表 1.1.2-62　　滑动轴承主要类型及结构

类型		结构	特点及应用
向心滑动轴承	整体式	JB 2560—79	构造简单，常用于低速、载荷不大的间歇工作的机械上。其缺点：1）当滑动表面磨损而间隙过大时，无法调整轴承间隙；2）轴颈只能从端部装入，安装不方便
	剖分式	JB 2561—79，JB 2562—79	装拆方便，轴承间隙可以在一定范围内进行调整，所以多用在经常装拆或装拆有困难的机器中 JB 2561—79 为二螺柱正滑动轴承，而 JB 2562—79 为四螺柱正滑动轴承。一般剖分面最好与载荷方向近于垂直
	调心式	R(球)　d　B	可以自动调位以适应轴颈在轴弯曲时所产生的偏斜。一般多采用在宽径比$B/d>1.5$的轴承中
推力滑动轴承	固定式	F_a　d_0　d　端面式 F_a　d　d_0　多环式	用来承受轴向载荷。当与向心轴承联合使用时，可以承受复合载荷。端面式多采用空心轴颈，使端面上压力分布均匀。多环式不仅能承受较大的轴向载荷，还可以承受双向的轴向载荷
	摆动瓦式	F_a　转轴　活动瓦块　支承	轴承是由数个支承在圆柱面或球面上的扇形块组成。扇形块为钢背，滑动表面复以轴瓦材料。轴承工作时，扇形块能随运转情况的变化自动调节斜度，改变最小油膜厚度

8.2 轴瓦和轴承衬的材料

轴瓦及轴承衬是滑动轴承中重要零件，必须具备下述性能：（1）摩擦系数小；（2）导热性好，热膨胀系数小；（3）耐磨、耐腐蚀、抗胶合性能强；（4）要有足够的机械强度和可塑性。为了满足上述要求，对重要的轴承常做成双层金属的轴瓦，以便性能上取长补短，即采用浇铸或压合的方法，将薄层材料粘附在轴瓦基体上，粘附上去的薄层材料称为轴承衬。常用的轴瓦和轴承衬材料的性能如表 1.1.2-63 所示。

表 1.1.2-63　　常用轴瓦和轴承衬材料的性能

材料及其代号		最大许用值				最小轴颈硬度 HB	备注
		[p] MPa	[v] m/s	[pv] MPa$\frac{m}{s}$	t ℃		
锡锑轴承合金	ZChSnSb11-6	平稳载荷			150	150	抗胶合性和耐腐蚀性高，但机械强度较低，通常作为轴承衬使用。多用在高速、重载下工作的重要轴承，如汽轮机，内燃机，高转速机床主轴的轴承及大功率的电动机轴承等
		25	80	20			
	ZChSnSb 8-4	冲击载荷					
		20	60	15			
铅锑轴承合金	ZChPbSb 16-16-2	15	12	10	150	150	可作为锡锑轴承合金的代用品，但耐腐蚀性差，多用于中速、中等载荷的轴承，如压缩机，轧钢机，车床，发电机等的轴承衬
	ZChPbSb 15-15-3	5	6	5			
锡青铜	ZQSn 10-1	15	10	15	280	300～400	用于中速、重载及受变载荷的轴承
	ZQSn 5-5-5	8	3	12			用于中速、中等载荷的轴承，如减速器，起重机的轴承及机床的一般主轴轴承
	ZQSn 6-6-3	5	3	10			
铅青铜	ZQPb 30	21～28	12	30	250～280	300	用于高速、重载轴承，能承受变载荷和冲击载荷，也适用于精密机床主轴轴承
铝青铜	ZQAl 9-4	15	4	12		280	最宜用于润滑充分的低速重载轴承

注：表中[pv]值为混合摩擦润滑下的许用值。

8.3 润滑剂和润滑方法

按滑动轴承的润滑情况可分为：混合摩擦润滑轴承和液体摩擦润滑轴承两大类。对混合摩擦润滑轴承而言，润滑剂是用来降低摩擦，减少磨损和提高轴承的效率。对液体摩擦润滑轴承而言，润滑剂是工作介质，同时对轴承起冷却作用。轴承能否正常工作，与正确选用润滑剂有很大关系。

金属轴承常用润滑脂和润滑油作润滑剂。此外，也有使用固体（如石墨、二硫化钼）或气体（如空气）作润滑剂的。

1)润滑脂及其选择

润滑脂是由润滑油和各种稠化剂（如钙、钠、铝、锂等金属皂）混合稠化而成。密封简单，不须经常加添，不易流失，对载荷和速度的变化有较大的适应范围，受温度的影响不大，

但摩擦损耗较大，机械效率低，且流动性能差，无冷却效果。常用在混合摩擦润滑轴承中那些要求不高，难以经常供油，或者特别低速重载及摇摆运动之处。选择润滑脂牌号时可参考表 1.1.2-64。

表 1.1.2-64　　**滑动轴承润滑脂的选择**

比压 p (MPa)	圆周速度 v (m/s)	最高工作温度 (℃)	建议选用的牌号
≤1.0	≤1	75	3 号钙基脂
1.0～6.5	0.5～5	55	2 号钙基脂
1.0～6.5	≤0.1	-50～100	锂基脂
≤6.5	0.5～5	120	2 号钙基脂
>6.5	≤0.5	75	3 号钙基脂
>6.5	≤0.5	110	1 号钙基脂
>6.5	0.5	60	2 号压延机脂

2)润滑油及其选择

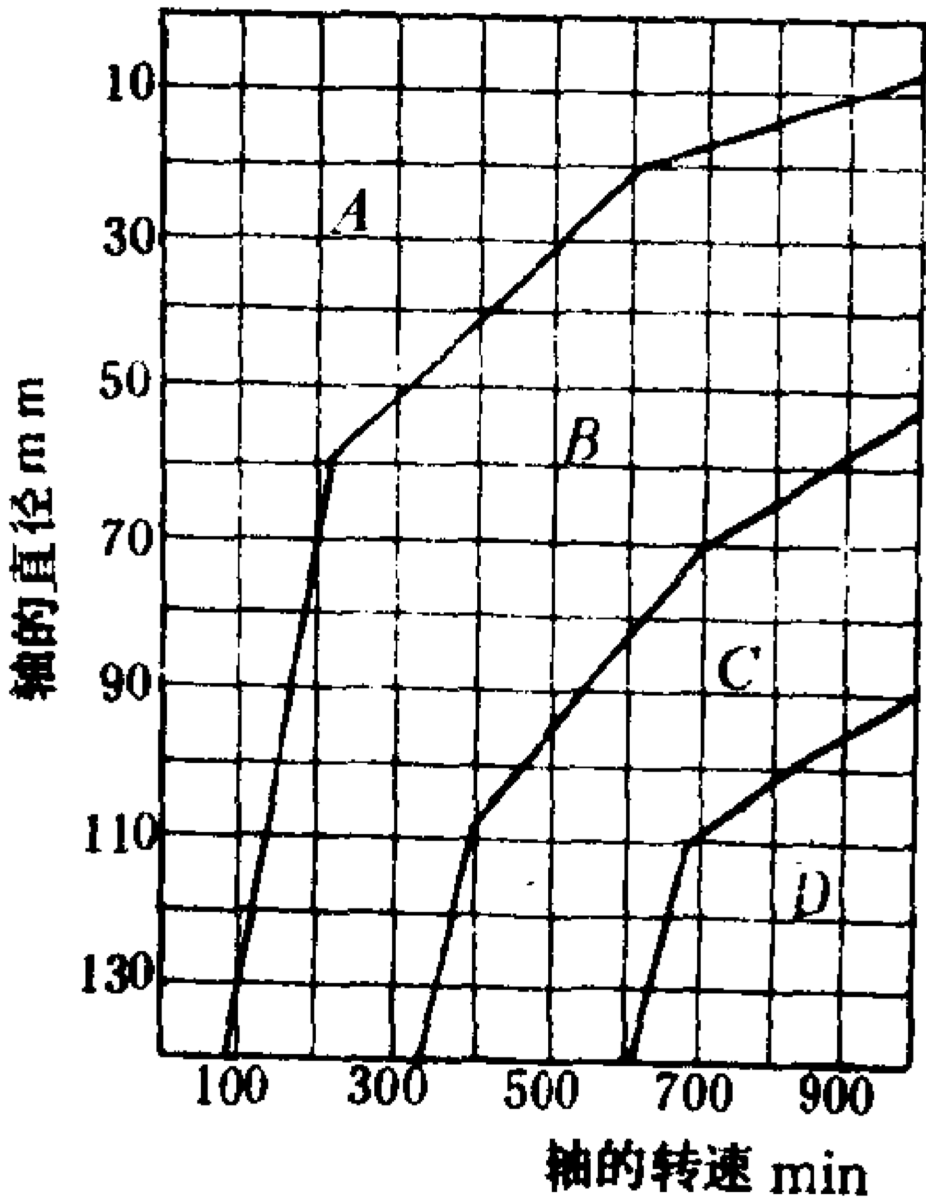


图 1.1.2-42　选择润滑油粘度的线图

润滑油的主要物理和化学性能指标是：粘度、油性、闪点、凝点、酸值、残碳量等。对于液体摩擦润滑动压轴承，粘度是最重要的指标，也是选择轴承用油的主要依据。原则上，当转速高、比压小时，可选粘度较低的油；反之，应选粘度较高的油。

润滑油粘度随温度的升高而降低。故在较高温度下工作的轴承（当$t>60$℃），所用润滑油的粘度应比通常高些。具体选择时可参看图 1.1.2-42 和表 1.1.2-65。

表 1.1.2-65　　**选择润滑油粘度的参考数据**

单位压力 p (MPa)	荐　用　粘　度 Pa·s (50℃时的动力粘度)			
	A	B	C	D
～0.5	0.0145～0.0195	0.0138～0.01737	0.01005～0.0131	0.0085～0.01158
0.5～6.5	0.0408～0.0473	0.0342～0.0408	0.0242～0.0309	0.0138～0.0195
6.5～15	0.057～0.0763	0.044～0.0505	0.0309～0.044	0.0242～0.0375

对混合摩擦润滑轴承的润滑油选择见表 1.1.2-66。

表 1.1.2-66　　混合摩擦润滑轴承的润滑油选择（$t<60°C$）

轴颈速度 v, m/s	平均压强 $p<3$ MPa	轴颈速度 v, m/s	平均压强 $p=3\sim7.5$ MPa
<0.1	50、70、90 号机械油，10、15 号汽油机油	<0.1	90 号机械油，15 号汽油机油
0.1~0.3	40、50、70 号机械油，10 号汽油机油	0.1~0.3	70、90 号机械油，15 号汽油机油
0.3~2.5	30、40 号机械油，30 号汽轮机油，6 号汽油机油	0.3~0.6	70 号机械油，10 号汽油机油，13 号压缩机油
2.5~5	20、30 号机械油，30 号汽轮机油	0.6~1.2	40、50、70 号机械油，6、10 号汽油机油
5~9	10、20 号机械油，20、30 号汽轮机油	1.2~2	40、50 号机械油
>9	5、7、10 号机械油		

滑动轴承在工作时的润滑状态与润滑方法有关。滑动轴承的给油方法有多种多样，常用的有下列五种方式：

1)间歇润滑　通过油枪和油杯加油，结构最简单，但一般不能调节油量。如加油不及时，容易造成磨损。常用油杯的标准见GB 1152—79~GB 1156—79。

2)滴油润滑　只适用于润滑油，它是利用油的自重通过润滑装置把油引到滑动表面上。常用的有油芯式（GB 1157—79）和针阀式（GB 1158—79）。

3)油环润滑　轴颈上套有油环，油环下垂浸到油池里，轴颈回转时油环把油带到轴颈上去。这种装置适用的转速范围为（60~100）<n<（1500~2000）r/min。转速过低，油环不能把油带起；转速过高，环上的油会被甩掉。

4)飞溅润滑　依靠旋转的机件或附加在轴上的甩油盘，将油池中的润滑油溅成油星以润滑轴承。

5)压力循环润滑　利用重力或油泵使循环系统的润滑油达到一定的工作压力后输送到轴承中，使用过的油送回油箱，经冷却、过滤等处理以后再供循环使用。船舶上动压轴承多采用该方式给油。

8.4 混合摩擦润滑滑动轴承的验算

8.4.1 向心滑动轴承

表 1.1.2-67　　向心滑动轴承的验算

验算项目及公式	符号意义
（一）限制轴承平均压强 p $p=\frac{F}{dB}\le[p]$ MPa	F——轴承径向载荷，N d和B——轴颈直径及有效宽度，mm $[p]$——许用压强，MPa（查表 1.1.2-63）
（二）限制轴承 pv 值 $pv=\frac{Fn}{19100B}\le[pv]\text{MPa}\frac{\text{m}}{\text{s}}$	n——轴颈转速，r/min $[pv]$——轴瓦材料的 pv 许用值，MPa$\frac{\text{m}}{\text{s}}$ （查表 1.1.2-63）
（三）限制滑动速度 v $v=\frac{\pi dn}{1000\times60}\le[v]$m/s	$[v]$——许用速度，m/s（查表 1.1.2-63）

8.4.2 推力滑动轴承

表 1.1.2-68　**推力滑动轴承的验算**

验算项目及公式	符号意义
（一）限止轴承平均压强p $p=\dfrac{F_a}{\dfrac{\pi}{4}(d^2-d_0^2)Z}\leq[p]\mathrm{MPa}$	Fa——轴向载荷，N d_0、d——轴颈的内、外直径，mm Z——轴环数 $[p]$——推力滑动轴承的许用压强，MPa
（二）限止轴承pv_m值 $pv_m=\dfrac{F_a n}{30000(d-d_0)Z}\leq[pv_m]\mathrm{MPa}\dfrac{m}{s}$	n——轴颈转速，r/min $[pv_m]$——推力滑动轴承的pv_m许用值，$\mathrm{MPa}\dfrac{m}{s}$

表 1.1.2-69　**推力滑动轴承的许用$[p]$和$[pv_m]$值**

轴材料	未淬火钢			淬火钢		
轴承材料	铸铁	青铜	轴承合金	青铜	轴承合金	淬火钢
$[p]$ MPa	2～2.5	4～5	5～6	7.5～8	8～9	12～15
$[pv_m]$ $\mathrm{MPa}\dfrac{m}{s}$	1～2.5					

注：对于多环轴承，各环受力不均匀，表中$[p]$和$[pv_m]$值应降低50%。

8.5 液体摩擦润滑滑动轴承

8.5.1 获得液体摩擦的主要方法

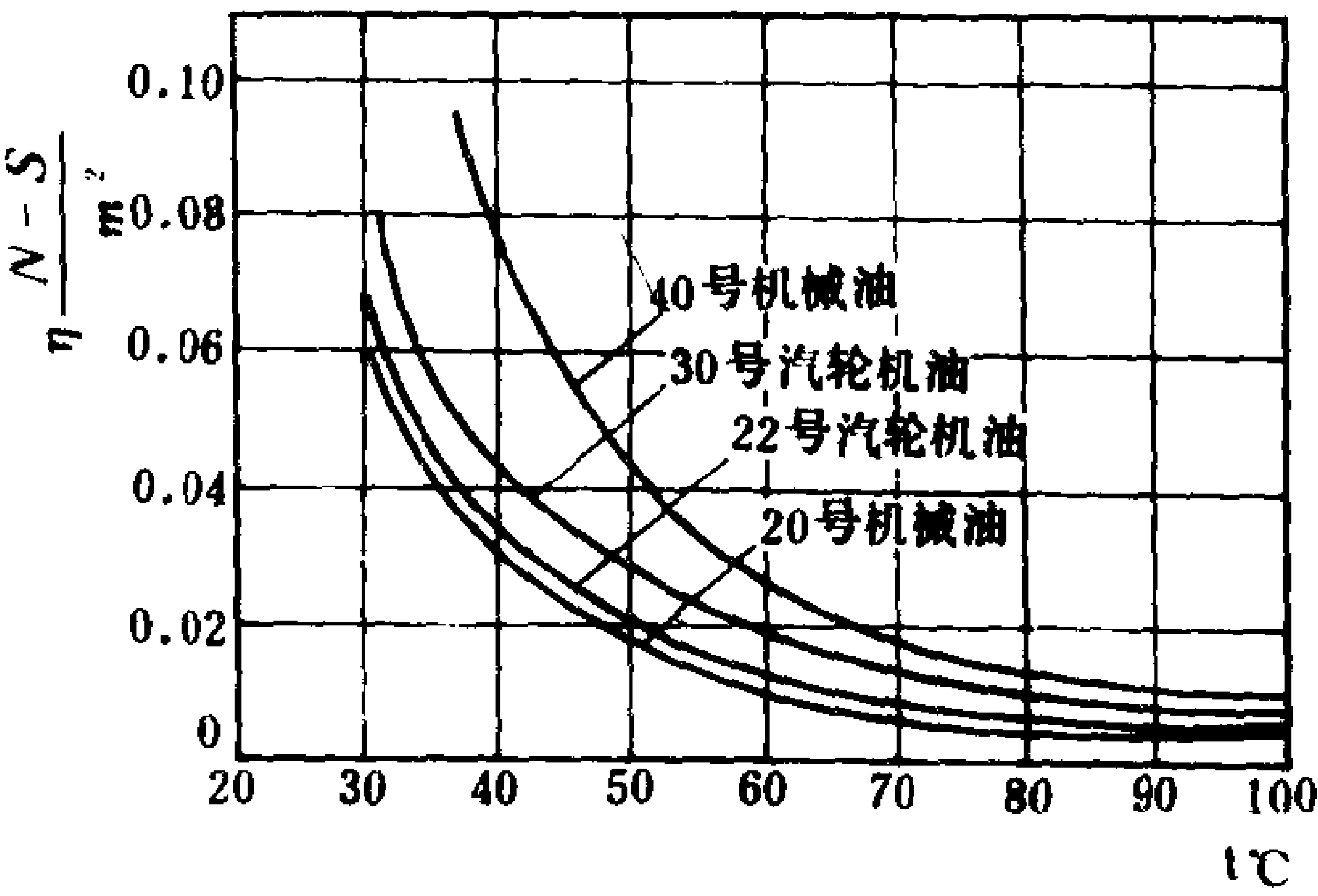


图 1.1.2-43　润滑油的粘温图

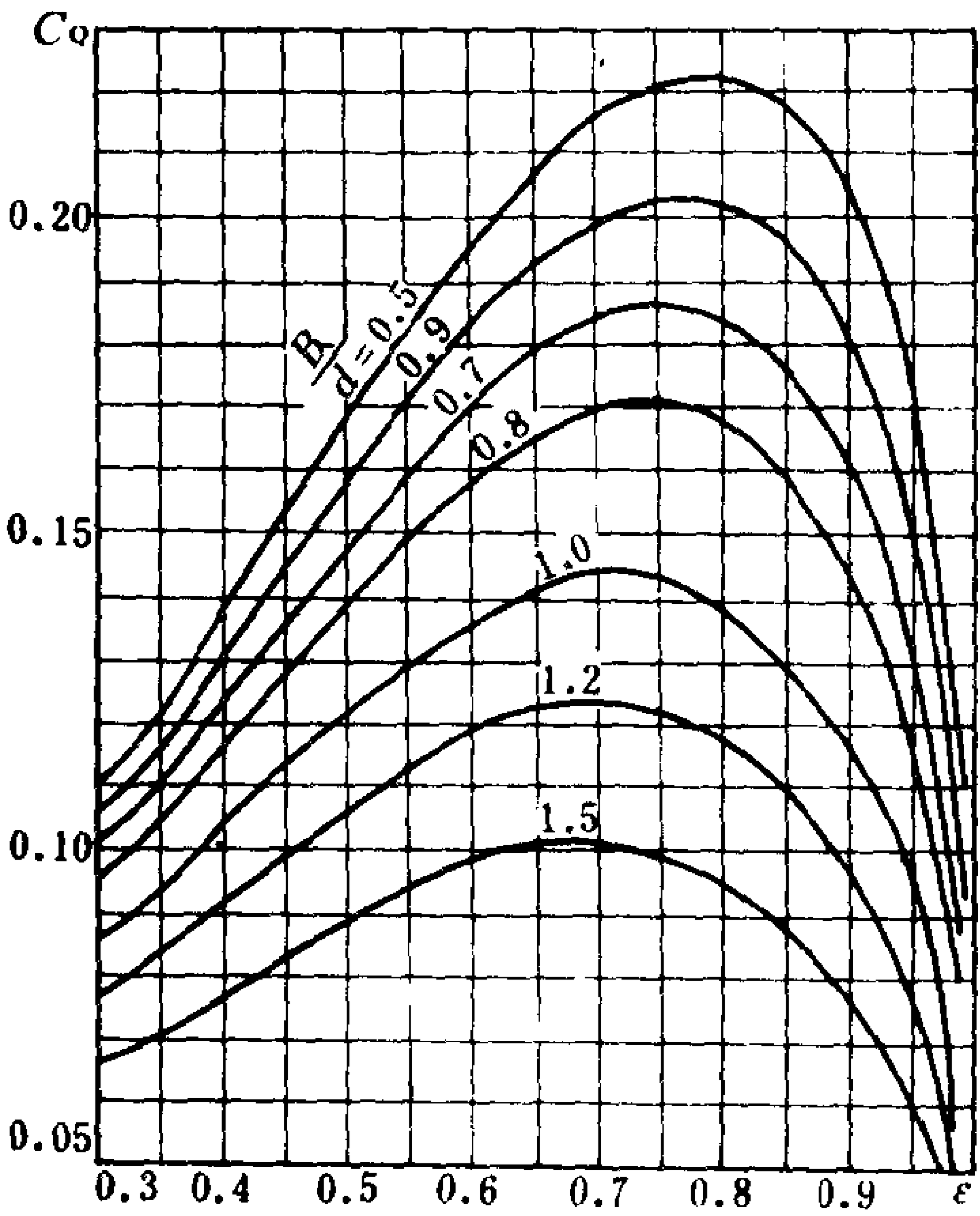


图 1.1.2-44　动压向心轴承的耗油量系数C_Q

获得液体摩擦主要有两种方法：(1) 在滑动表面间用足以平衡外载的压力输入润滑油，使两个滑动面强制分离，换言之，即用油压把轴颈顶起，用这种方法来实现液体摩擦的轴承称为液体静压轴承；(2) 利用轴颈本身回转时的泵油作用，把油带入摩擦面间，建立压力油

膜而把摩擦面分开，用这种方法来实现液体摩擦的轴承称为**液体动压轴承**。船舶上要实现液体摩擦的轴承多为动压轴承。要实现液体动压润滑必须具备3个条件：（1）两滑动表面间必须有楔形间隙；（2）两滑动表面间必须连续充满润滑油；（3）两滑动表面间的运动件运动方向必须保证润滑油从大剖面流进，从小剖面流出。

8.5.2 动压向心滑动轴承的计算

已知条件：（1）轴承径向载荷F，（2）轴颈直径d，（3）轴承宽度B，（4）轴颈转速n。

计算：见表1.1.2-70～表1.1.2-72。

表1.1.2-70　　**动压向心滑动轴承的计算**

验算项目及步骤	说　明
（一）确定轴承平均工作温度t_m	一般要求$t_m \leq 75℃$，初算时可取$t_m=50℃$
（二）确定润滑油粘度η及润滑油牌号 先按图1.1.2-42和表1.1.2-65确定合适的润滑油动力粘度η，然后根据η和t_m从图1.1.2-43查出润滑油牌号	若润滑油牌号已给定，则可按润滑油牌号和t_m从图1.1.2-43查出润滑油粘度η
（三）计算轴颈圆周速度v $v=\dfrac{\pi dn}{1000\times 60}$ m/s	式中的单位为：d——mm；n——r/min
（四）确定相对间隙ψ 按经验公式$\psi=(0.6\sim1)\times10^{-3}\sqrt[4]{v}$	对于重载、$B/d<0.8$、能自动调心的轴承，或当轴承材料硬度较低时，ψ可取小值，反之取大值。
（五）确定偏心率ε 按承载量系数$C_P=\dfrac{F\cdot\psi^2}{2\eta\cdot B\cdot v}$算出$C_P$，然后根据$C_P$和$B/d$从表1.1.2-71查出$\varepsilon$	式中单位为：F——N； B——m； v——m/s
（六）验算最小油膜厚度h_{min} $h_{min}=\dfrac{d}{2}\psi(1-\varepsilon)\geq S(R_{z1}+R_{z2})$	式中：R_{z1}、R_{z2}——轴颈与轴承表面不平度的平均高度，查表1.1.2-72 S——安全系数，一般取$S\geq2$
（七）热平衡验算 （1）验算润滑油温升 $\Delta t=\dfrac{\dfrac{f}{\psi}\cdot p}{C_Q\cdot C\cdot\rho+\pi\dfrac{K_s}{\psi v}}\leq 30℃$ （2）验算轴承平均工作油温 $t_m=t_1+\dfrac{\Delta t}{2}\leq 75℃$ t_1为润滑油进口温度，通常取$t_1=30\sim45℃$ 若算出的t_m与原假设不符，应重新假设t_m再作计算，直至假设与计算基本上相符为止（一般相差不得超过3～5℃）	式中：f——摩擦系数，$f=\dfrac{\pi}{\psi}\cdot\dfrac{\eta\omega}{p}+0.55\psi\xi$ 对于$B/d<1$时，$\xi=\left(\dfrac{d}{B}\right)^{1.5}$； $B/d\geq1$时，$\xi=1$ 式中的单位：d、B——m；w——rad/s p——Pa（N/m²）；η——Pa.s（$\dfrac{N\cdot s}{m^2}$） C_Q——耗油量系数，查图1.1.2-44 C——润滑油比热，约为1680～2100 $\dfrac{J}{kg\cdot ℃}$ ρ——润滑油密度，约为850～900 $\dfrac{kg}{m^3}$ K_s——轴承的散热系数，J/(m²·s·℃)：散热不良，取$K_s=50$；普通通风条件，取$K_s=80$；冷却良好，取$Ks=140$
（八）选择配合并验算Δ_{max}和Δ_{min} 算出直径间隙$\Delta=\psi d$ 按GB 1801—79选择适当配合得Δ_{max}和Δ_{min}，使Δ介于两者之间。算出ψ_{max}和ψ_{min}看两者是否都满足最小油膜厚度和热平衡的要求	若不满足要求，就需要选配合，直至所选配合在极限直径间隙Δ_{max}和Δ_{min}的情况下，满足最小油膜厚度h_{min}和热平衡的要求为止
（九）验算p、pv值和v 验算公式与混合摩擦润滑轴承相同，见表1.1.2-67	因动压轴承在起动和停车时处于混合摩擦润滑状态，所以也需进行计算

表 1.1.2-71　　　　　　　　　　　**动压向心轴承的承载量系数 C_P**

$\frac{B}{d}$	偏心率 ε													
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.65	0.7	0.75	0.80	0.85	0.90	0.925	0.95	0.975	0.99
	承载量系数 C_P													
0.3	0.0522	0.0826	0.128	0.203	0.259	0.347	0.475	0.699	1.122	2.074	3.352	5.73	15.15	50.52
0.4	0.0893	0.141	0.216	0.339	0.431	0.573	0.776	1.079	1.775	3.195	5.055	8.393	21.00	65.26
0.5	0.133	0.209	0.317	0.493	0.622	0.819	1.098	1.572	2.428	4.261	6.615	10.706	25.62	75.85
0.6	0.182	0.283	0.427	0.655	0.819	1.070	1.418	2.001	3.036	5.214	7.956	12.64	29.17	83.21
0.7	0.234	0.361	0.538	0.816	1.014	1.312	1.720	2.399	3.580	6.029	9.072	14.14	31.83	88.90
0.8	0.287	0.439	0.647	0.927	1.199	1.538	1.965	2.754	4.053	6.721	9.992	15.37	33.99	92.89
0.9	0.339	0.515	0.754	1.118	1.371	1.745	2.248	3.067	4.459	7.294	10.753	16.37	35.66	96.35
1.0	0.391	0.589	0.853	1.253	1.528	1.929	2.469	3.372	4.808	7.772	11.38	17.18	37.00	98.95
1.1	0.440	0.658	0.947	1.377	1.669	2.097	2.664	3.580	5.106	8.186	11.91	17.86	38.12	101.15
1.2	0.487	0.723	1.033	1.489	1.796	2.247	2.838	3.787	5.364	8.533	12.35	18.43	39.04	102.90
1.3	0.529	0.784	1.111	1.590	1.912	2.379	2.990	3.968	5.586	8.831	12.73	18.91	39.81	104.42
1.5	0.610	0.891	1.248	1.763	2.099	2.600	3.242	4.266	5.947	9.304	13.34	19.68	41.07	106.84
2.0	0.763	1.091	1.483	2.070	2.446	2.981	3.671	4.778	6.545	10.091	14.34	20.97	43.11	110.79

表 1.1.2-72　　　　　　　　　　　**表面不平度的平均高度 R_Z**

加工方法	精车或精镗，中等磨光，刮（每平方厘米内有 1.5～3 个点）		铰，精磨，刮（每平方厘米内有 3～5 个点）		钻石刀头镗，镗磨		研磨，抛光，超精加工等		
表面粗糙度等级	2.5 1.25 ∇	1.25 0.63 ∇	0.63 0.32 ∇	0.32 0.16 ∇	0.16 0.08 ∇	0.08 0.04 ∇	0.04 0.02 ∇	0.02 0.01 ∇	<0.01 ∇
表面不平度的平均高度 R_z，μm	>6.3 ～10	>3.2 ～6.3	>1.6 ～3.2	>0.8 ～1.6	>0.4 ～0.8	>0.2 ～0.4	>0.1 ～0.2	>0.05 ～0.1	～0.05

8.5.3 液体静压轴承简介

静压轴承是依靠一套给油装置，用油泵将高压油送到轴承的间隙里，强制形成油膜，保证在起动、停止和正常运转时期内，轴颈与轴承之间均无直接接触，始终处于液体润滑状态。图 1.1.2-45 是静压向心轴承的示意图。高压油经节流器进入油腔，当轴承载荷为零时，轴颈与轴孔同心，各油腔的油压彼此相等，即 $p_1=p_2=p_3=p_4$。当轴承受载荷 F 时，轴颈偏移，各油腔附近的间隙不同，受力大的油膜减薄，流量减小，因此经过这部分的节流器的流量也减小，在节流器中的压力降也减小，但是油泵的压力 p_s 保持不变，所以下油腔中的压力 p_3 将增大。同理，上油腔的压力 p_1 将减小。轴承依靠压力差 (p_3-p_1) 平衡外载荷 F。由此可知，应用节流器能随外载荷的变化而自动调节各油腔内的压力，所以，节流器

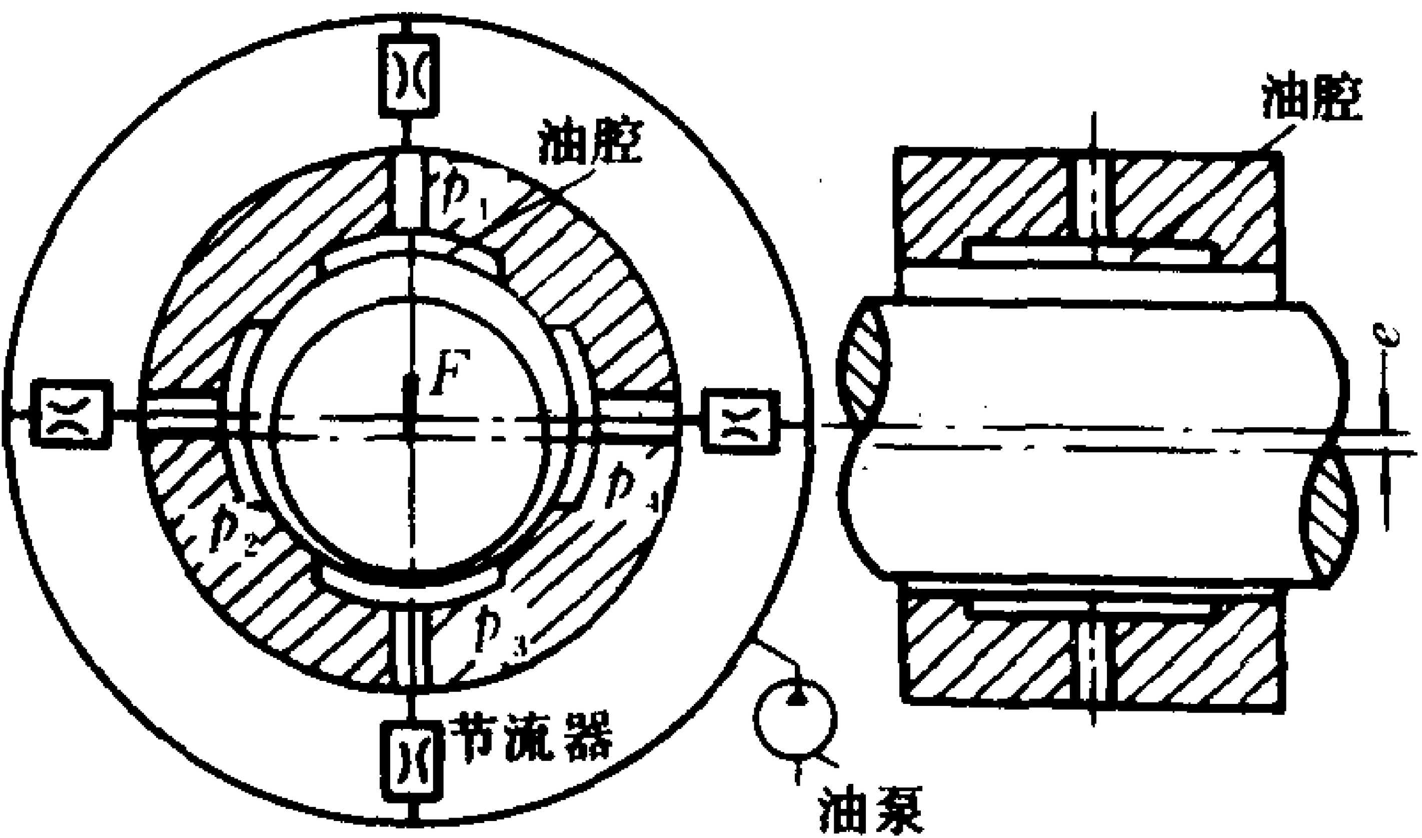


图 1.1.2-45　静压向心轴承工作原理

是静压轴承中的关键部件。

静压轴承的特点是：(1)在轴颈转动之前就可形成油膜，因此起动力矩小，效率高；(2)由于它在起动、停车和运转时期内，轴颈与轴承均不直接接触，理论上轴瓦不会磨损，能长期保持精度，故使用寿命长；(3)提高油压p_s就可提高承载能力，所以在重载条件下也可获得液体摩擦润滑。

9 滚动轴承

9.1 滚动轴承的主要类型和特点

表 1.1.2-73　　滚动轴承的主要类型和特点

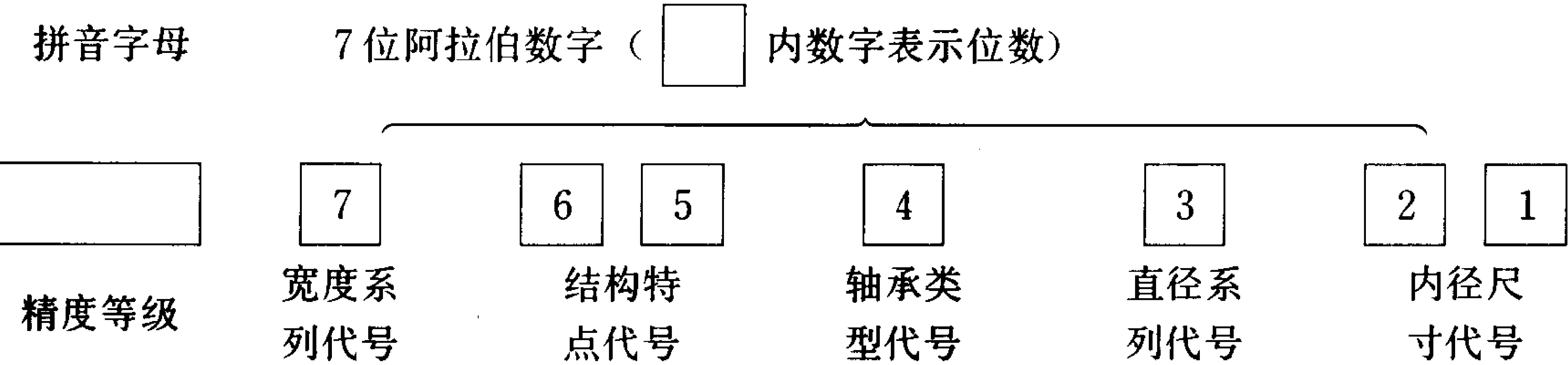
结构简图及类型代号	类型名称及标准编号	极限转速	允许角偏移	特点
0000	单列向心球轴承 GB276—64	高	2′~10′	主要承受径向载荷，也可同时承受一定量的轴向载荷。在高转速、较小轴向载荷时，可代替推力球轴承承受纯轴向载荷。可大量生产，价格最低
1000	双列向心球面球轴承 GB281—64	中	2°~3°	主要承受径向载荷，同时也能承受少量的轴向载荷(一般不宜承受纯轴向载荷)。因为外圈滚道表面是以轴承中点为中心的球面，故能自动调心。
2000	单列向心短圆柱滚子轴承 GB283—64	较高	2′~4′	能承受较大的径向载荷。因外圈(或内圈)可以分离，故不能承受轴向载荷。工作时允许内、外圈有少量的轴向错动。这类轴承还可以不带外圈或内圈。
3000	双列向心球面滚子轴承 GB286—64	低	1°~2.5°	能承受很大的径向载荷，同时还能承受少量的轴向载荷。承载能力大，调心性能好

续上表

结构简图及类型代号	类型名称及标准编号	极限转速	允许角偏移	特点
74000	滚针轴承 GB289—64	低	不允许	只能承受径向载荷。在径向载荷相同的条件下，与其他类型轴承比较，其外径最小。一般不带保持架因而摩擦大。若无内圈，其代号为 84000
5000	螺旋滚子轴承 GB291—64	低	≤30′	只能承受径向载荷。由于滚子是用窄钢带卷成的空心柱，故有弹性，能承受径向冲击载荷，但精度低。可不带内圈（代号为 35000）或不带外圈（代号为 65000）
6000	向心推力球轴承 GB292—64	较高	2′～10′	可同时承受径向、轴向联合载荷也可承受纯轴向载荷。接触角越大，轴向承载能力也越大。接触角α有 12°（代号为 36000）、26°（46000）、36°（66000）三种。通常成对使用，可分装于两个支点或同装于一个支点上
7000 27000	单列圆锥滚子轴承 GB297—64 GB298—64	中	2′	能同时承受较大的径向、轴向联合载荷。接触角有$\alpha \approx$ 12°（代号为 7000，GB297—64，以承受径向载荷为主）和$\alpha \approx 26°$（代号为 27000，GB298—64，以承受轴向载荷为主）。内、外圈可分离，装拆方便，一般也是成对使用（与 6000 相同）
8000 38000	单向推力球轴承 GB301—64 双向推力球轴承 GB302—64	低	不允许	只能承受轴向载荷，而且载荷作用线必须与轴线相重合，以保证钢球载荷的均匀分配。有两种类型：（1）8000 型（只承受单向推力）；（2）38000 型（可承受双向推力）。高速时，离心力大，钢球与保持架磨损、发热严重，寿命降低，故常用在轴向载荷大而转速不高之处
39000	推力向心球面滚子轴承 GB303—64	低	2°～3°	能承受很大的轴向载荷，也可同时承受不大的径向载荷。滚子呈腰鼓形，外圈滚道为球面，能自动调心

9.2 滚动轴承的代号

滚动轴承的类型很多，在各个类型中又可做成不同的结构、尺寸和精度等级。为了统一表征各类轴承的特点，便于组织生产和选用，GB272—64规定了滚动轴承代号的表示方法如下：



内径尺寸代号　右起第1、2位数字表示轴承的内径尺寸。当轴承内径在20～495 mm范围内时，内径代号×5＝轴承内径尺寸，mm。内径为10～17 mm的代号见表1.1.2-74。

表1.1.2-74　　**轴承内径代号**

内　径　代　号	00	01	02	03	04～99
轴承内径 mm	10	12	15	17	数字×5

直径系列代号　右起第3位数字表示轴承直径系列代号。指内径相同的轴承在外径和宽度方面的变化系列，表示方法见表1.1.2-75。

表1.1.2-75　　**轴承直径系列代号**

轴　承　类　型	向心轴承和向心推力轴承						推力轴承和推力向心轴承			
直　径　系　列	特轻	轻	中	重	轻宽	中宽	特轻	轻	中	重
代　　号	1、7	2	3	4	5	6	9、1	2	3	4

注：轻宽或中宽系列是指内、外径与轻型或中型皆相同而宽度较大。

轴承类型代号　右起第4位数字表示轴承类型代号。表示方法见表1.1.2-73。若为单列向心球轴承，其代号为0，可不必写出。

结构特点代号　右起第5、6位数字表示轴承结构特点代号。例如：向心推力球轴承36000和46000代号中的右起第5位数“3”和“4”分别表示轴承公称接触角$\alpha=12°$和$\alpha=26°$；双列向心球面滚子轴承113000代号中的右起第5、6位数“11”表示内孔为圆锥的。若为正常结构时，代号为0，可不必写出。

宽度系列代号　右起第7位数字表示轴承宽度系列代号。指同一内、外径的轴承，在宽度方面的变化系列，表示方法见表1.1.2-76。若对宽度无特殊要求时，代号为0，可不必写出。

表1.1.2-76　　**轴承宽度（高度）系列代号**

轴承类型	向心轴承和向心推力轴承											推力轴承和推力向心轴承		
宽度(高度)系列	特窄	窄		正　常		宽		特　宽				特低	低	正常
代　号	8	0	7	0	1	2	0	3	4	5	6	7	9	0、1
说　明	—	只用于轻、中系列	—	只用于特轻系列	—	—	只用于轻、中系列	—	—	—	—	—	—	—

一般正常宽度又无特殊结构的轴承，右起第5、6、7位数字皆为0，在代号中不写出。所以，常见的轴承代号只有四位数字，“0”类轴承只有三位数字。

精度等级　目前生产的滚动轴承制造精度有C、D、E、G四级，C级最高，顺次逐步降低。G级为普通级，应用最广，在代号中不必标出。更高精度的B级，待列入国家标准。

9.3 滚动轴承类型的选择

滚动轴承类型的选择，要按轴承的工作载荷(包括大小、方向、性质)、转速和工作要求，结合表1.1.2-73各类型轴承的特性，适当地选择所需的轴承类型。表1.1.2-77供选择轴承类型时参考。

表1.1.2-77　**滚动轴承类型的选择**

轴承工作情况	宜选的轴承类型
转速较低、而轴承承受较大的载荷时	宜选用滚子轴承
转速较高，而轴承承受较小的载荷时	宜选用球轴承
有强烈的径向冲击载荷，但对旋转精度要求不高时	宜选用螺旋滚子轴承
轴承只承受径向力或以径向力为主时	宜选用向心球轴承
轴承承受的径向力和轴向力都较大时	宜选用向心推力轴承
轴承承受的轴向力大过径向力时	宜选用大接触角向心推力轴承
轴向力比径向力大很多或要求轴向位移很小时	宜选推力轴承和向心轴承组合结构，分别承当轴向力和径向力
当两个轴承孔不同轴线或由于加工、安装误差及轴挠曲变形大等原因使轴承内、外圈倾斜角较大时	宜选用球面调心轴承1000或3000型
若轴承座没有剖分面而必须沿轴向安装和拆卸轴承部件时	优先选用内、外圈可分离的轴承，如7000或2000型
若要求轴承径向尺寸小（如内燃机连杆中的轴承）	宜选用滚针轴承

9.4 滚动轴承的失效和计算准则

滚动轴承的失效形式主要有以下几种。

点蚀　滚动轴承受载后各滚动体的受力大小不同。对于回转的轴承，由于滚动体与内、外圈间产生变化的接触应力，工作若干时间后，各元件接触表面首先在表层下产生疲劳裂纹，然后逐渐扩展到表面，形成疲劳点蚀。有时由于安装不当，使轴承局部受载较大，更促使点蚀早期发生。通常，疲劳点蚀是滚动轴承的主要失效形式。

塑性变形　在很大的静载荷或冲击载荷作用下，滚动体或内、外圈滚道上将出现不均匀的塑性变形凹坑。这时，轴承的摩擦力矩、振动、噪声都将增加，运转精度降低，使轴承不能正常工作。

磨损　在多尘条件下工作的滚动轴承，虽然采用密封装置，滚动体与内、外圈仍有可能磨损。此外，圆锥滚子轴承的滚子大端与套圈挡边、推力球轴承球与保持架、滚道之间在工作时都有可能发生滑动摩擦，如润滑不充分，也会发生磨损，并引起表面发热、胶合。速度越高，发热及磨损将越严重。

此外，由于操作、维护不当，也能引起元件破裂、锈蚀等失效形式。

轴承尺寸的确定，要针对主要失效形式进行必要的计算。根据以上三种主要失效形式，计算准则可归纳如下：

1）对于回转的滚动轴承，疲劳点蚀经常发生，主要应进行寿命计算。

2）对于不转动、摆动或转速很低的轴承，一般不会产生疲劳点蚀，但要控制塑性变形，故应作静强度计算。

3）对于高速轴承，由于发热而造成的磨损、烧伤常常是突出的矛盾，除应进行寿命计算外，还必须验算极限转速。

9.5 滚动轴承的寿命计算

滚动轴承额定寿命L（r）或L_h（h）的基本计算公式

$$L=10^6\left(\frac{C}{P}\right)^{\varepsilon}\text{r} \quad (1.1.2\text{-}21)$$

或

$$L_h=\frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P}\right)^{\varepsilon}\text{h} \quad (1.1.2\text{-}22)$$

式中：L或L_h——额定寿命。一批同样的轴承，在相同条件下运转，其中90%的轴承不发生疲劳点蚀的总转数（r）或在给定转速下的工作小时数（h），通常取机器中修或大修年限作为轴承的设计寿命，表1.1.2-78的寿命荐用值可供设计计算时参考；

C——额定动载荷。系指额定寿命为一佰万转（10^6r）时所能承受的载荷（N），在轴承样本中给出了G级精度的各种轴承在极限转速以下、工作温度$t\leq$120℃时的额定动载荷C值。当工作温度$t>$120℃时，须将样本中的C值乘以温度系数f_t予以降低。f_t的值见表1.1.2-79；

P——当量动载荷。当轴承同时承受径向力F_r和轴向力F_a时所引进的假定载荷，在该载荷作用下，轴承寿命与实际复合载荷作用下的轴承寿命相同。对向心和向心推力轴承，当量动载荷为一假定的径向载荷。对推力和推力向心轴承，当量动载荷为一假定的轴向载荷。当量动载荷的计算式见表1.1.2-80～表1.1.2-83；

ε——寿命指数。对球轴承$\varepsilon=3$，对滚子轴承$\varepsilon=10/3$。

表1.1.2-78　**轴承预期寿命的荐用值**

机器种类		预期寿命 h
不经常使用的仪器及设备		500
航空发动机		500～2000
间断使用的机器	中断使用不致引起严重后果的手动机械、农业机械等	4000～8000
	中断使用会引起严重后果，如升降机、运输机、吊车等	8000～12000
每天工作8小时的机器	利用率不高的齿轮传动、电机等	12000～20000
	利用率较高的通风设备、机床等	20000～30000
连续工作24小时的机器	一般可靠性的空气压缩机、电机，水泵等	50000～60000
	高可靠性的电站设备，给排水装置等	>100000

表1.1.2-79　**温度系数f_t**

轴承工作温度t,℃	≤120	125	150	175	200	225	250	300
f_t	1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.60

表 1.1.2-80　　　　　　　　　　**当量动载荷P的计算式**

轴　承　类　型	计算公式	说　　　明
向心球轴承、球面轴承、向心推力轴承和推力向心轴承	$P=f_P(XF_r+YF_a)$	f_P——载荷系数，查表 1.1.2-81 $X.Y$——分别表径向系数和轴向系数，由表 1.1.2-82 或轴承样本中查得 F_r——作用在轴承上的径向力，按求支点反作用力的方法求得 F_a——作用在轴承上的轴向力，对向心球轴承、球面轴承和推力轴承等，$F_a=F_A$（作用在轴上的轴向外载荷）；对向心推力轴承，F_a可查表 1.1.2-83
向心短圆柱滚子轴承、滚针轴承和螺旋滚子轴承	$P=f_PF_r$	
推力轴承	$P=f_PF_a$	

表 1.1.2-81　　　　　　　　　　**载　荷　系　数　f_P**

载荷性质	机　器　举　例	f_P
无冲击或轻微冲击	电机、汽轮机、水泵、通风机	1.0～1.2
中等冲击振动	机床、传动装置，起重机，内燃机，减速器，车辆	1.2～1.8
强大冲击振动	破碎机，轧钢机，石油钻机，振动筛	1.8～3.0

表 1.1.2-82　　　　　　　　　　**滚动轴承当量动载荷的X、Y值**

轴承型号		F_aC_0	轴向载荷的影响系数	$F_a/F_r\leq e$		$F_a/F_r>e$	
名　称	代　号		e	X	Y	X	Y
单列向心球轴承	0000	0.025 0.04 0.07	0.22 0.24 0.27	1	0	0.56	2.0 1.8 1.6
单列向心球轴承	0000	0.13 0.25 0.5	0.31 0.37 0.44	1	0	0.56	1.4 1.2 1.0
单列向心推力球轴承	36000	0.025 0.04 0.07 0.13 0.25 0.5	0.34 0.36 0.39 0.43 0.49 0.55	1	0	0.45	1.61 1.53 1.40 1.26 1.12 1.00
	46000	—	0.70	1	0	0.41	0.85
	66000	—	0.99	1	0	0.36	0.64
单列圆锥滚子轴承	7000 27000	—	可取 1.5 tgα，具体数值按不同型号在轴承样本中查出	1	0	0.4	按不同型号在轴承样本中查出
双列向心球面球轴承	1000	—		1	按不同型号在轴承样本中查出	0.65	
双列向心球面滚子轴承	3000	—		1		0.67	

* C_0称为额定静载荷，见 9.6 条。

表 1.1.2-83 向心推力轴承轴向力F_a的计算

承受轴向外载荷F_A的方向及轴承安装方式	计算公式	说明
正安装 2 1 F_A S_2 S_1 F_{r2} F_{r1} 1 2 F_A S_1 S_2 F_{r1} F_{r2} 反安装	$F_{a1}=S_1$ $F_{a1}=F_A+S_2$ 取上式两值中的大者 $F_{a2}=S_2$ $F_{a2}=S_1-F_A$ 取上式两值中的大者 当轴向外载荷F_A与图示方向相反时，F_A应取负值	S_1、S_2——轴承 1 和 2 承受径向力后所产生的内部轴向力 向心推力球轴承 36000 型（$\alpha=12°$） $S=0.4F_r$ 46000 型（$\alpha=26°$） $S=0.7F_r$ 66000 型（$\alpha=36°$） $S=F_r$ 圆锥滚子轴承 7000 型 $S=F_r/2Y$

9.6 滚动轴承的静载荷计算

为了限制滚动轴承在静载荷和冲击载荷作用下产生过大的塑性变形，应进行静载荷计算，其公式为

$$C_0 \geqq S_0 P_0 \qquad (1.1.2\text{-}23)$$

式中：C_0——额定静载荷。指滚动轴承在C_0作用下，受载最大的滚动体与较弱的套圈滚道接触处产生的塑性变形量之和是滚动体直径d_0的万分之一。其值可查轴承样本；

S_0——静载荷安全系数。见表 1.1.2-84；

P_0——当量静载荷。对同时承受径向力F_r和轴向力F_a的向心球轴承、向心球面轴承和向心推力轴承，P_0是假想的径向载荷，而对推力向心轴承，P_0则为假想的轴向载荷。在P_0作用下，滚动轴承的塑性变形量与实际受载情况完全相同。P_0的计算方法见表 1.1.2-85 和表 1.1.2-86。

表 1.1.2-84 静载荷安全系数S_0

工作条件	S_0
旋转精度和平稳性要求高或受强大冲击载荷的轴承	1.2～2.5
一般情况	0.8～1.2
旋转精度要求低，允许摩擦力矩较大，没有冲击振动的轴承	0.5～0.8

表 1.1.2-85 当量静载荷P_0的计算公式

轴承类型	计算公式	说明
向心球轴承、向心球面轴承和向心推力轴承	$P_0=X_0F_r+Y_0F_a$	X_0Y_0——静径向系数和静轴向系数查表 1.1.2-86 或轴承样本
向心短圆柱滚子轴承、滚针轴承和螺旋滚子轴承	$P_0=F_r$	
推力轴承	$P_0=F_a$	
推力向心轴承	$P_0=F_a+2.3F_r\text{tg}\alpha$	P_0应折合成当量的轴向静载荷

表 1.1.2-86　　　　　　**滚动轴承当量静载荷的X_0、Y_0值**

轴承类型	代号	单列轴承		双列轴承	
		X_0	Y_0	X_0	Y_0
单列向心球轴承	0000	0.6	0.5		
向心推力球轴承	36000	0.5	0.48	1	0.96
	46000		0.37		0.74
	66000		0.28		0.56
圆锥滚子轴承	7000		0.22 ctgα*		0.44 ctgα*
双列向心球面球轴承	1000			1	0.44 ctgα*
双列向心球面滚子轴承	3000				0.44 ctgα*

* 具体数值可从轴承样本中查得。

9.7 滚动轴承的极限转速

极限转速是指滚动轴承在一定载荷和润滑条件下所允许的最高转速。若轴承转速超过极限转速时，会使摩擦面产生高温，影响润滑剂性能，使油膜破坏，从而导致元件严重磨损或胶合。各种型号轴承在脂润滑和油润滑条件下的极限转速n_{lim}已在轴承样本中列出。这些数值仅适用于当量动载荷$P \leq 0.1C$，润滑与冷却条件正常，向心轴承仅受径向力、推力轴承仅受轴向力的G级精度轴承。当轴承的当量动载荷$P > 0.1C$时，n_{lim}应乘以载荷系数f_1（查图 1.1.2-46）；当向心和向心推力轴承同时承受径向和轴向载荷时，n_{lim}应乘以载荷分布系数f_2（查图 1.1.2-47）。因此，轴承允许最高转速

$$n_{max} \leq f_1 f_2 n_{lim} \tag{1.1.2-24}$$

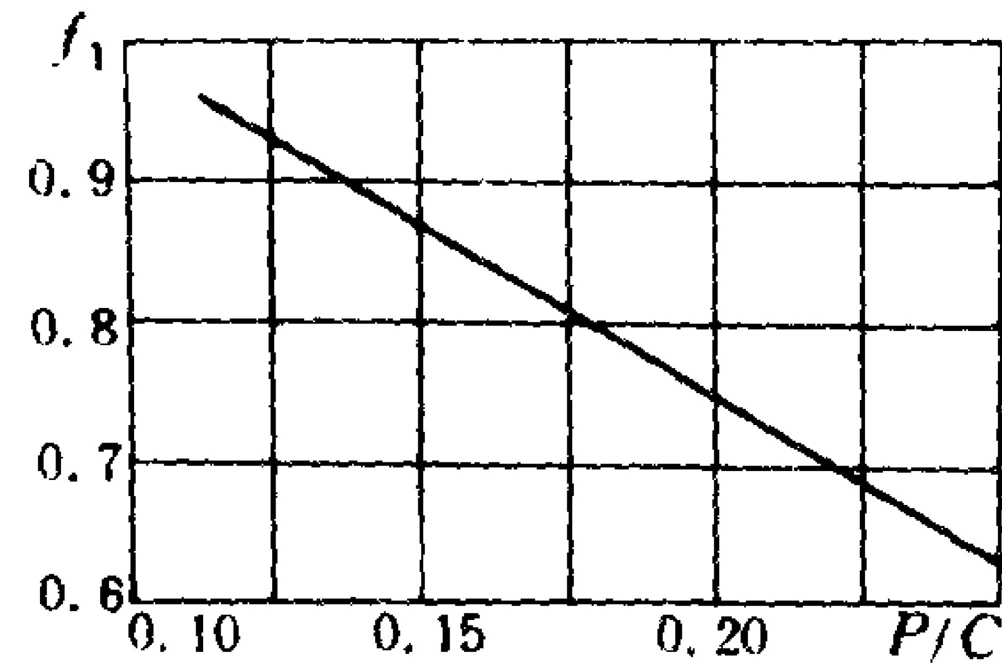


图 1.1.2-46　载荷系数f_1

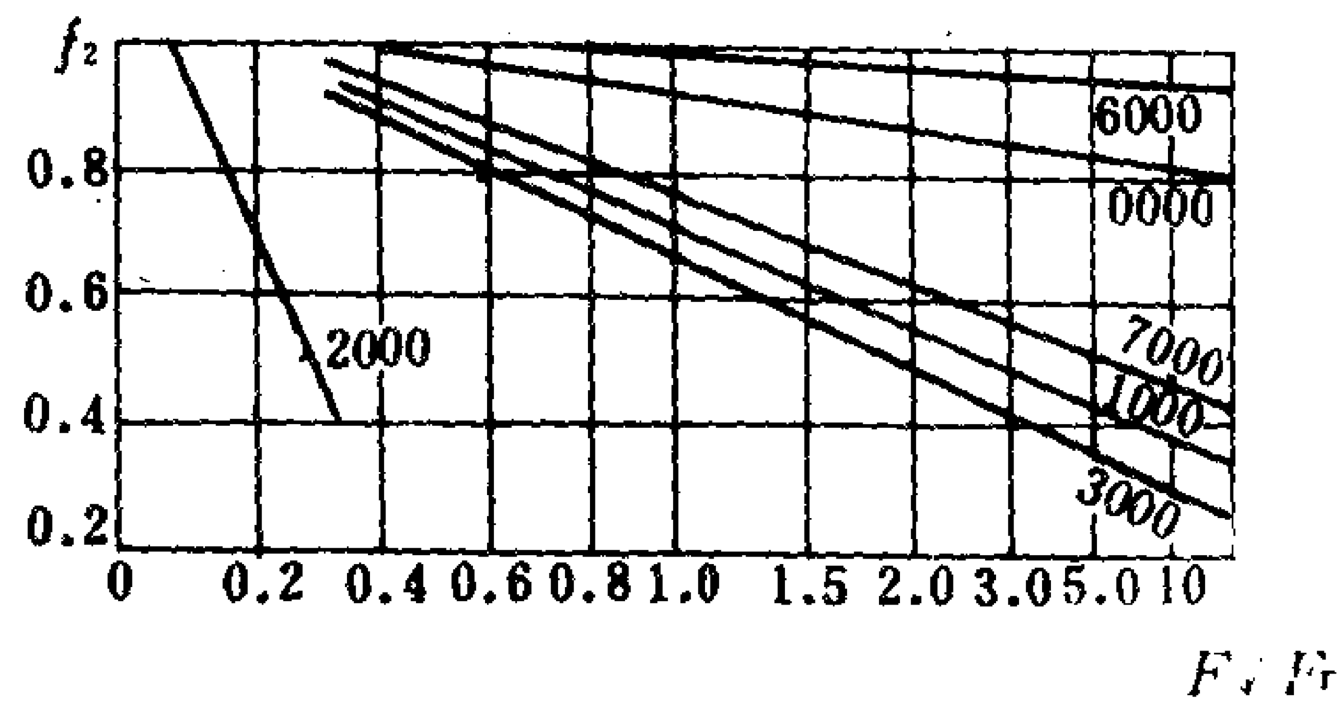


图 1.1.2-47　载荷分布系数f_2

9.8 滚动轴承的润滑和密封

滚动轴承的润滑　润滑对滚动轴承具有重要意义，轴承中的润滑剂主要是为了降低摩擦阻力和减轻磨损，也有吸振、冷却、防锈、密封等作用。

轴承常用润滑方式有油润滑和脂润滑两类。此外，也有使用固体润滑剂润滑的。选用哪一类润滑方式，与轴承速度有关，一般速度高的轴承都采用油润滑，冷却和润滑效果较好。减速器轴承常利用齿轮溅油润滑，如轴承采用浸油润滑，则油面应不高于最下方滚动体的中心。脂润滑因不易流失，故便于密封和维护，且一次充填润滑脂后可运转较长时间。但润滑脂的装填量一般不超过轴承空间的 1/3～1/2，装脂过多，由于摩擦引起发热，会影响轴承的

正常工作。具体选择润滑方式可按速度因数dn值来定。d为轴承内径(mm)；n为轴承转速(r/min)，dn值间接地反映了轴颈的圆周速度，当$dn <(1.5 \sim 2)\times 10^5$mm·r/min时，可采用脂润滑，超过这一范围宜采用油润滑。

滚动轴承的密封　密封是为了阻止润滑剂从轴承中流失，同时也防止外界灰尘、水分、酸气和其他杂物进入轴承。密封方法可分两大类：接触式密封和非接触式密封。前一类用于速度不很高的场合，后一类用于高速。各种密封装置的结构、适用范围和性能见表1.1.2-87。

表1.1.2-87　**常用滚动轴承的密封型式**

密封类型	结构型式	适用场合	说明
接触式密封	毛毡圈密封	脂润滑。要求环境清洁，轴颈圆周速度v不大于4～5 m/s，工作温度不超过90℃	矩形剖面的毛毡圈被安装在梯形槽内，它对轴产生一定的压力而起到密封作用。结构简单，但压紧力不能调整
	皮碗密封 a) b)	脂或油润滑。圆周速度$v <$ 7 m/s，工作温度在−40～100℃	皮碗用皮革、塑料或耐油橡胶制成，可具有(或没有)金属骨架，皮碗是标准件。图(a)密封唇朝里，防漏油性能好；图(b)密封唇朝外，防尘性能好
非接触式密封	油沟密封	脂润滑。要求干燥清洁环境，圆周速度$v <$ 5～6 m/s，也可用于低速油润滑	靠轴与盖间的细小环形油沟密封，油沟内填脂，盖与轴的间隙约为0.1～0.3 mm

续上表

密封类型	结构型式	适用场合	说明
非接触式密封	迷宫式密封 径向式　轴向式 b)	脂润滑或油润滑。工作温度不高于密封用脂的滴点。密封效果可靠，圆周速度$v<30$ m/s	将旋转件与静止件之间间隙做成迷宫（曲路）形式，在间隙中充填润滑油或润滑脂以加强密封效果。有径向、轴向两种：(a) 径向式，间隙$\delta\leq$ 0.1～0.2 mm；(b)轴向式，间隙$\delta=1.5\sim2$ mm

10 联轴器和离合器

10.1 联轴器和离合器的用途、分类、特点、应用和选择

联轴器和离合器主要用来联接不同机构中的两根轴(有时也联接轴与其他回转零件)，以传递运动和扭矩，有时也可用作安全装置。其分类、特点及应用见表 1.1.2-88。

表 1.1.2-88　　联轴器和离合器的分类、特点及应用

分类			特点	应用
联轴器	固定式联轴器		被联接的两根轴，只有在机器停车后，经过拆卸才能把它们分离	用在两轴能严格对中并在工作中不发生相对位移的场合
	可移式联轴器	刚性的		用在两轴有一定的安装误差或在工作中有相对位移的场合
		弹性的		
离合器	牙嵌式离合器		在机器工作中就能方便地将被联接的两根轴分离或接合	因联接时不产生摩擦热，故特别适用于不允许温升的机械中。但只宜用在两轴不回转时或转速差很小时进行接合的地方，否则易断齿
	摩擦式离合器			要求两轴能在任何转速下进行接合或要求过载时能自动打滑，使其他零件免受损坏的机械中多采用它

联轴器和离合器的类型很多，其中大都已标准化。在选择时，一般先根据工作要求选定合适的类型，然后按照计算扭矩T_C、轴径d和轴的转速n从标准中选择所需的型号。在重要场合下，对其中个别关键性零件还应作必要的验算。

计算扭矩T_C时将机器起动时的惯性力和工作中可能出现的过载现象考虑在内。

$$T_C=KT \tag{1.1.2-25}$$

式中，T为公称扭矩，N·m；K为载荷系数，其值见表 1.1.2-89。

表 1.1.2-89　　　　　　　　　　载荷系数 K

工作机工作情况及举例	原动机			
	电动机，汽轮机	≥四缸内燃机	双缸内燃机	单缸内燃机
扭矩变化很小，如发电机，小型离心泵，小型通风机	1.3	1.5	1.8	2.2
扭矩变化小，如透平压缩机，木工机床，运输机	1.5	1.7	2.0	2.4
扭矩变化中等，如增压泵，搅拌机，有飞轮压缩机，冲床	1.7	1.9	2.2	2.6
扭矩变化和冲击载荷中等，如织布机，水泥搅拌机，拖拉机	1.9	2.1	2.4	2.8
扭矩变化和冲击载荷大，如造纸机，挖掘机，起重机，碎石机	2.3	2.5	2.8	3.2
扭矩变化大并有极强烈冲击载荷，如无飞轮的活塞泵，压延机	3.1	3.3	3.6	4.0

10.2　固定式联轴器

这类联轴器有套筒式、夹壳式和凸缘式等。这里只介绍船上使用最广的凸缘联轴器。凸缘联轴器主要是由两个分装在轴端的半联轴器和联接它们的螺栓所组成。制造联轴器的材料通常为：中载、$v\leq 35$ m/s时，采用中等强度的铸铁；重载、$v\leq 75$ m/s时，采用锻钢或铸钢（v为联轴器外缘的圆周速度）。

按对中方法不同，凸缘联轴器有 I 型和 II 型两种型式（见表 1.1.2-90 中的图）：I 型是由带凸肩的半联轴器和带凹槽的半联轴器相嵌合而对中；II 型是用铰制孔螺栓对中（若扭矩不大，可一半用铰制孔螺栓，其余用普通螺栓）。

凸缘联轴器对中精度可靠，传递扭矩较大，但要求两轴同轴度好，主要用于载荷平稳的联接中。该联轴器已有标准（重型机械行业统一标准），设计时只要按计算扭矩 T_C、轴径 d 和轴的转速 n 从表 1.1.2-90 中选一标准型号即可。对重要机械还应对联接螺栓进行强度验算。

表 1.1.2-90　　　　　　　　凸缘联轴器（Q/ZB121—73）

I 型　　　　　　　　II 型

型号	d_1 d_2 H_7	d_3 H_7	d_4 $\frac{H_9}{h_9}$	d_5	D	D_1	D_2	L	l	l_1	C	螺栓 d_6	螺栓 数量	允许最大扭矩 N·m	允许最大转速 r/min	转动惯量 kg·m²	质量 kg
GZ1	40 45 50	13	70	70	160	125	80	145	70	20	2.5	M12	4	400	3500	0.0225	6.6

续上表

型号	d_1 d_2 H_7	d_3 H_7	d_4 $\frac{H_9}{h_9}$	d_5	D	D_1	D_2	L	l	l_1	C	螺栓 d_6'	螺栓 数量	允许最大扭矩 N·m	允许最大转速 r/min	转动惯量 kg·m²	质量 kg
GZ2	55 60 65	17	100	100	200	155	100	205	100	23	4	M16	4	1500	2800	0.065	11.9
GZ3	70 75 80	17	110	110	235	195	130	265	130	30	4	M16	6	2600	2400	0.157	22
GZ4	90 100 110 120	21	150	150	290	250	190	325	160	32	4	M20	6	6000	1900	0.61	48.3
GZ5	130 140 150 160	25	220	220	390	340	250	445	220	35	5	M24	6	16000	1450	2.39	119

10.3 可移式联轴器

由于制造、安装等误差，两轴精确对中并不是在任何情况下都能办到。有些机械即使安装时能保证对中，但由于工作温度变化大、回转零件的不平衡、基础下沉等原因，两轴的相对位置也会发生变化。在这种场合，最好采用可移式联轴器。

用可移式联轴器来补偿两轴偏斜和位移的方法有两种方式：（1）利用联轴器工作零件间构成的动联接具有某一方向或几个方向的活动度来补偿——刚性可移式联轴器；（2）利用联轴器中弹性元件的变形来补偿——弹性可移式联轴器。下面介绍常用的几种型式。

10.3.1 十字滑块联轴器

十字滑块联轴器是由两个在端面上开有凹槽的半联轴器1和一个两面带有凸牙的中间盘2所组成（图1.1.2-48）。中间盘两面的凸牙位于互相垂直的两个直径方向上，安装时，中间圆盘的两面凸牙分别嵌在两个半联轴器的凹槽中而构成一动联接。工作时凸牙可在凹槽中滑动，故可补偿安装及运转时两轴间的偏移。

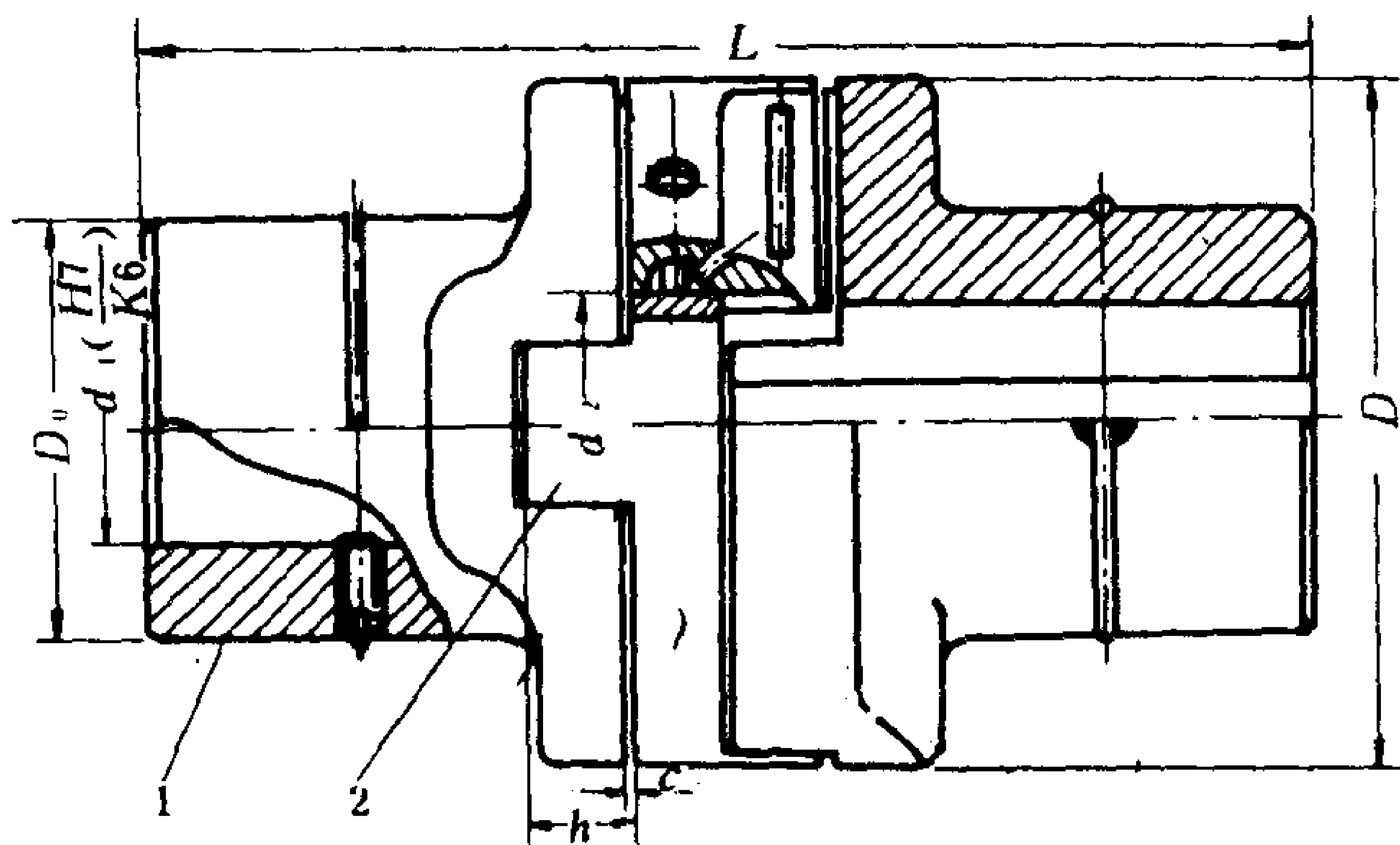


图1.1.2-48 十字滑块联轴器

这种联轴器的径向尺寸较小，主要用于轴线间相对径向位移较大、无冲击和转速不高的两轴联接。其许用相对径向位移$y=0.04d$ mm（d为轴径），许用相对角位移$\alpha=30'$。联轴器效率一般约

为0.95～0.97。设计时先按计算扭矩T_C、轴径d和轴的转速n，从表1.1.2-91中选一推荐尺寸，然后验算凸牙和凹槽侧面的比压：

$$p=\frac{6T_CD}{h(D^3-d_1^3)}\leq [p] \tag{1.1.2-26}$$

式中，T_C为计算扭矩，N·cm；h为凸牙厚度，cm；d_1、D为中间盘内、外径，cm。[p]为许用比压(未淬火钢对铸铁，[p]=1,000～1,500 N/cm²；淬火钢对淬火钢，润滑良好时，[p]=1,500～3,000 N/cm²)。

表1.1.2-91　　**十字滑块联轴器**

d_1	D_0	D	L	h	d_2	C	转动惯量 kg·m²	质量 kg	许用转速 r/min	许用扭矩 N·m
15 17 18	32	70	95	10	18 20 22	$0.5^{+0.3}_{0}$	0.0005	1.5 1.47 1.43	250	120
20 25 30	45	90	115	12	25 30 34		0.002	2.68 2.55 2.50		250
36 40	60	110	160	16	40 45		0.0065	5.57 5.21		500
45 50	80	130	200	20	50 55		0.0175	10.00 9.46		800
55 60	95	150	240	25	60 65		0.035	15.40 14.46		1250
65 70	105	170	275	30	70 75		0.0625	22.41 21.29		2000
75 80	115	190	310	34	80 85		0.125	31.50 29.80		3200
85 90	130	210	355	38	90 95	$1.0^{+0.5}_{0}$	0.225	44.77 42.46		5000
95 100	140	240	395	42	100 105		0.4	59.44 57.02		8000
110 120	170	280	435	45	115 130		0.75	91.50 84.29	100	10000
130 140	190	320	485	50	140 150		1.425	129.55 120.00		16000
150	210	340	550	55	160		2.1	162.55		20000

注：(1) 该联轴器材料可用45号钢，工作表面须进行淬火HRC=46～60。

(2) 表中各尺寸的符号见图1.1.2-48。

10.3.2　万向联轴器

万向联轴器又称虎克联轴器或铰链联轴器。它由两个叉形接头1、3，一个中间联接件2和轴销4（包括销套及铆钉）、5所组成（图1.1.2-49）。轴销4与5互相垂直配置，并分别把两个叉形接头与中间联接件2联接起来，构成了一个可动的联接。该联轴器允许两轴间有较大的夹角(夹角α_{max}可达35°～45°)，而且在机器运转时，夹角发生改变仍可正常传动。

该联轴器当主动轴角速度ω_1为常数时，从动轴的角速度ω_3是在一定范围内（$\omega_1\cos\alpha$

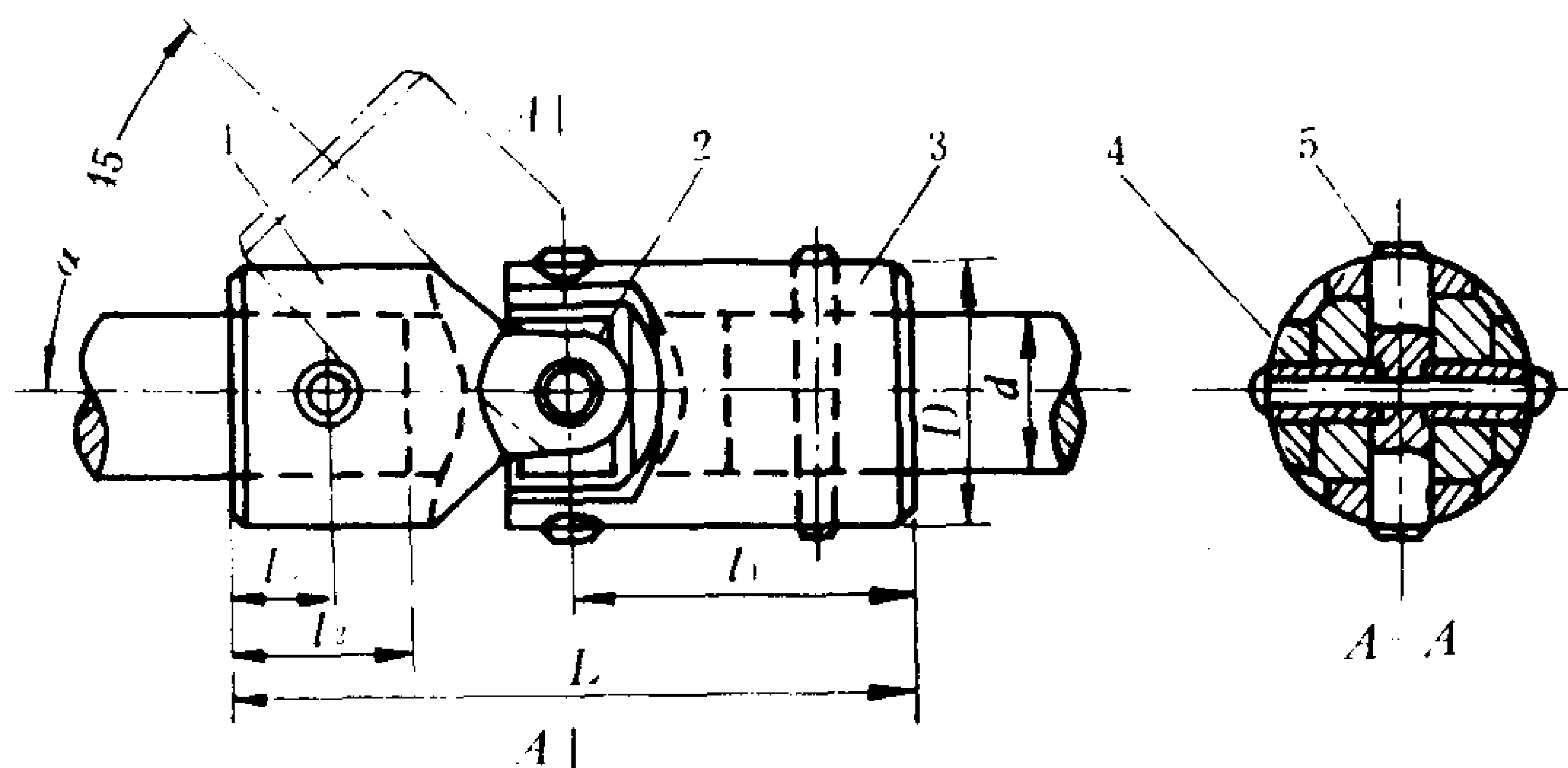


图 1.1.2-49 万向联轴器

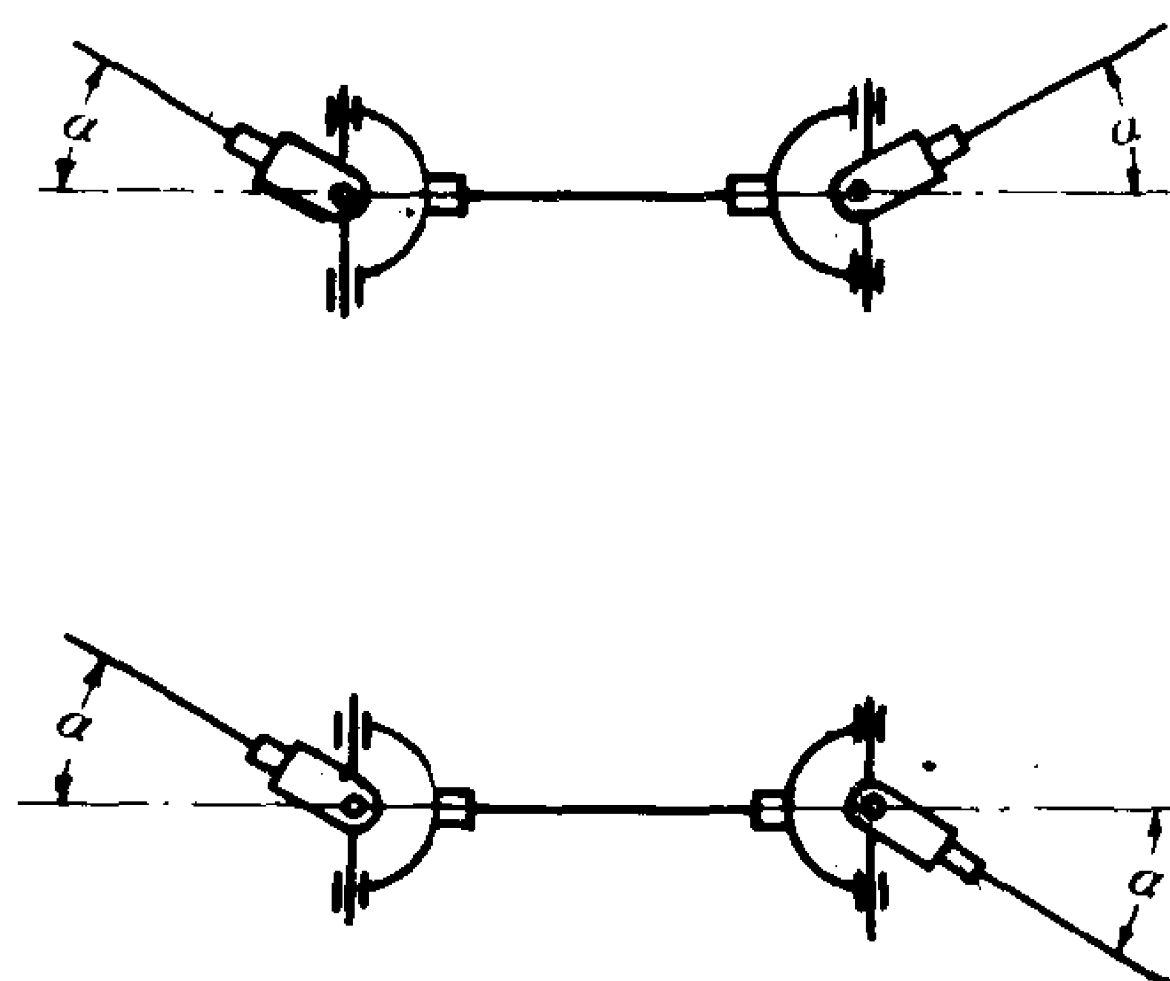


图 1.1.2-50 双万向联轴器

$\sim\omega_1/\cos\alpha$）变化，因而在传动中将产生附加动载荷。为了改善这种情况，常将万向联轴器成对使用，但应注意安装时必须保证O_1轴、O_3轴与中间轴之间的夹角相等（图 1.1.2-50），并且中间轴的两端叉形接头应在同一平面内。这样的双万向联轴器才可以得到$\omega_3=\omega_1$。

万向联轴器各元件的材料，除铆钉用 20 号钢外，其余多用合金钢，且多采用滚针轴承，以获得较高的耐磨性及较小的尺寸。它结构紧凑，维护方便，在汽车、拖拉机、轧钢机和金属切削机床中已获得广泛应用。小型万向联轴器已有推荐规格，设计时可按计算扭矩T_C和轴径d从表 1.1.2-92 中选一推荐尺寸。

表 1.1.2-92 **小型万向联轴器主要尺寸**

d	D	l_1	l_2	l_3	L	许用扭矩 N·m
8	16	29	20	14	58	12.5
10	20	31	20	14	62	25
12	25	38	25	18	76	40
16	32	44	28	23	88	80
20	40	56	36	31	112	160
25	50	68	42	37	136	320
32	60	85	58	50	170	640
40	75	112	82	74	224	1280

注：表中各尺寸的符号见图 1.1.2-49。

10.3.3 齿轮联轴器

齿轮联轴器由两个具有外齿环的半联轴器和两个具有内齿环的外壳及若干螺栓所组成（图 1.1.2-51）。两个半联轴器分别与主、从动轴相联，两个外壳则用螺栓联接在一起，依靠内外齿相啮合以传递扭矩。轮齿齿廓为渐开线，其啮合角通常为 20°，由于轮齿间留有较大的间隙和外齿环的齿顶做成球面（球面中心应位于轴线上，有的还将轮齿做成鼓形齿），所以能补偿两轴的不同心和偏斜。其允许角位移$\alpha\leq 30'$（采用鼓形齿时α可达 3°），其径向位移$y=0.4\sim6.3$ mm。为了减少轮齿的磨损和相对移动时的摩擦阻力，在外壳内贮有润滑油。

齿轮联轴器通常用 45 号钢或ZG45制成。该联轴器能传递很大扭矩，并允许有较大的偏移量，安装精度要求不高，在重型机械中广泛应用。该联轴器已有标准（重型机械行业统一标

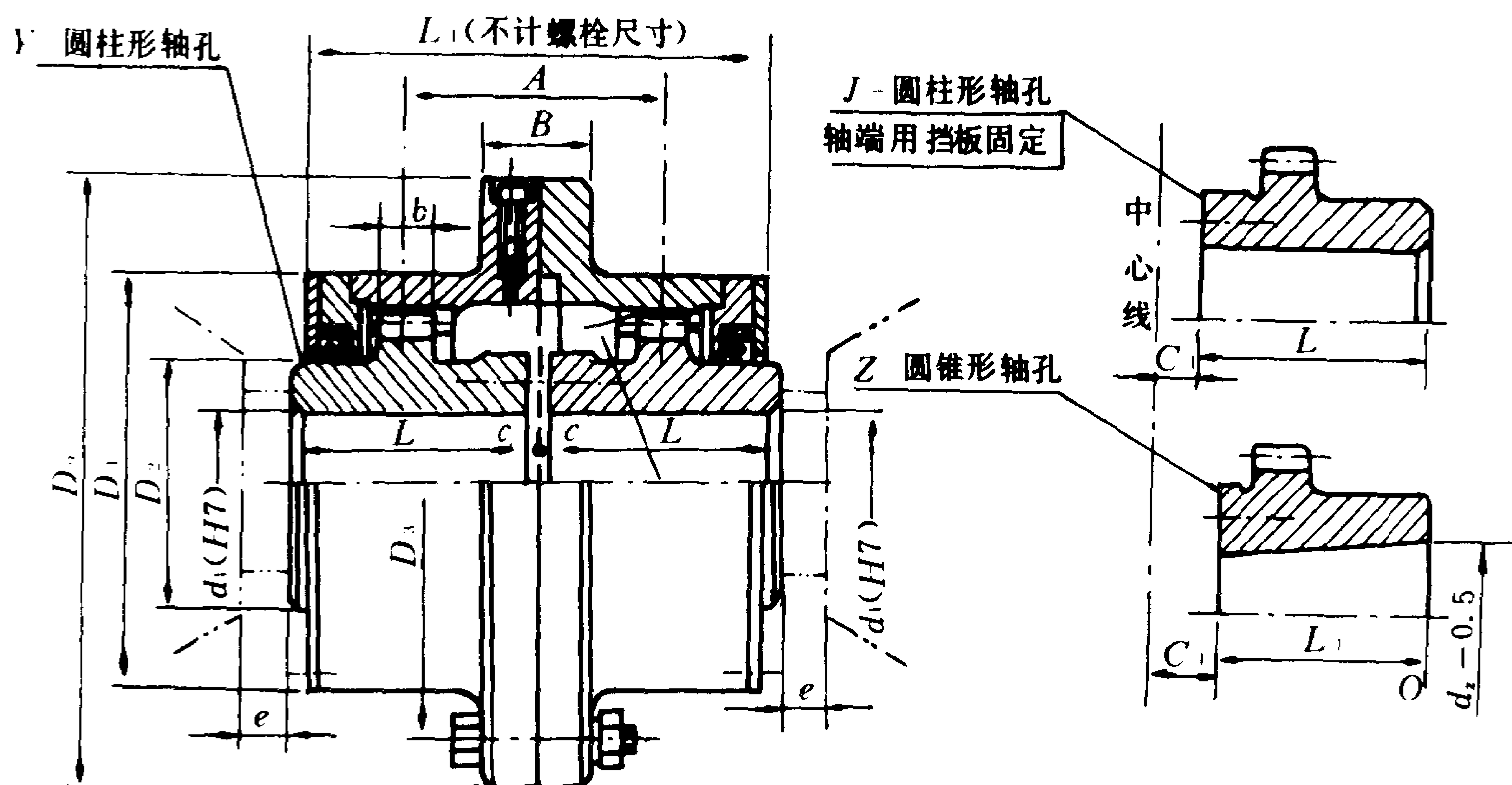


图 1.1.2-51 齿轮联轴器

准)，设计时只要按计算扭矩T_C、轴径d和轴的转速n从表 1.1.2-93 中选一标准型号。

表 1.1.2-93 **齿轮联轴器** (Q/ZB104—73)

型号	轴孔直径 d_1		d_2		d_z		内齿圈联接螺栓孔	齿轮 模数	齿轮 齿数	许用扭矩	许用转速	L	L_1	L_z
	min	max	min	max	min	max	$n-d_0$			N·m	rpm			
CL1	18	40	30	38	18	60	6—13	2.5	30	710	3780	115	55	60
CL2	30	50	40	55	30	70	6—13	2.5	38	1400	3000	145	70	85
CL3	40	60	40	55	40	90	6—17	3	40	3150	2400	170	85	85
CL4	45	75	60	75	45	100	8—17	3	48	5600	2000	215	105	110
CL5	50	90	80	95	50	120	8—21	3	56	8000	1680	235	115	135
CL6	60	105	—	—	60	130	8—21	4	48	11800	1500	255	125	—
CL7	65	120	100	120	65	150	10—21	4	56	19000	1270	285	140	170
CL8	80	140	130	150	80	170	10—21	4	62	23600	1140	325	160	205
CL9	90	160	—	—	90	190	10—25	6	46	30000	1000	335	165	—
CL10	110	180	—	—	110	210	12—25	6	56	50000	850	365	180	—
CL11	120	220	—	—	120	250	12—25	8	48	71000	750	405	200	—
CL12	140	250	—	—	140	280	14—25	8	54	100000	660	485	240	—
CL13	160	280	—	—	160	300	14—32	10	48	150000	600	525	260	—
CL14	180	320	—	—	180	340	16—32	10	54	200000	540	565	280	—
CL15	200	360	—	—	220	380	18—32	10	58	250000	480	645	320	—
CL16	230	400	—	—	230	420	18—38	12	56	375000	425	705	350	—
CL17	260	450	—	—	260	480	20—38	12	64	560000	380	805	400	—
CL18	300	500	—	—	300	530	20—38	12	72	750000	330	905	450	—
CL19	350	560	—	—	350	600	22—50	12	80	10^6	300	975	485	—

型号	D_0	D_1	D_2	D_3	B	b	A ≥	C	C_1	C_2	e	质量 kg	转动惯量 kg·m²
CL1	170	110	55	140	34	12	49	2.5	11	18	12	7.50	0.03
CL2	185	125	70	155	34	15	75	2.5	13	22	12	11.37	0.052
CL3	220	150	90	185	40	20	95	2.5	15	25	18	20.95	0.105

续上表

型号	D_0	D_1	D_2	D_3	B	b	A ≥	C	C_1	C_2	c	质量 kg	转动惯量 kg · m²
CL4	250	175	110	215	40	25	125	2.5	17	28	18	34.90	0.212
CL5	290	200	130	245	50	25	145	5	22	35	25	51.93	0.45
CL6	320	230	140	275	50	30	160	5	25	—	25	68.70	0.7
CL7	350	260	170	305	50	35	185	5	25	40	30	95.30	1.15
CL8	380	290	190	335	50	35	210	5	30	45	30	129.50	2.07
CL9	430	330	210	380	50	35	220	5	30	—	30	168.30	3.55
CL10	490	390	260	440	50	40	245	5	30	—	30	254.20	7
CL11	545	445	300	495	60	45	280	5	35	—	35	378.00	13.7
CL12	590	490	340	540	60	50	350	5	38	—	35	528.10	21.2
CL13	680	555	380	620	70	60	375	7.5	45	—	40	749.00	40
CL14	730	610	420	670	70	65	405	7.5	50	—	40	944.00	53.8
CL15	780	660	480	720	70	70	480	7.5	50	—	40	1278.03	81.2
CL16	900	755	530	830	90	75	535	10	—	—	50	1816.20	150
CL17	1000	855	630	930	90	90	625	10	—	—	50	2681.10	285
CL18	1100	950	710	1030	110	90	710	10	—	—	50	3529.00	400
CL19	1250	1050	800	1150	110	100	730	15	—	—	60	4801.50	675

注：表中各尺寸的符号见图 1.1.2-51。

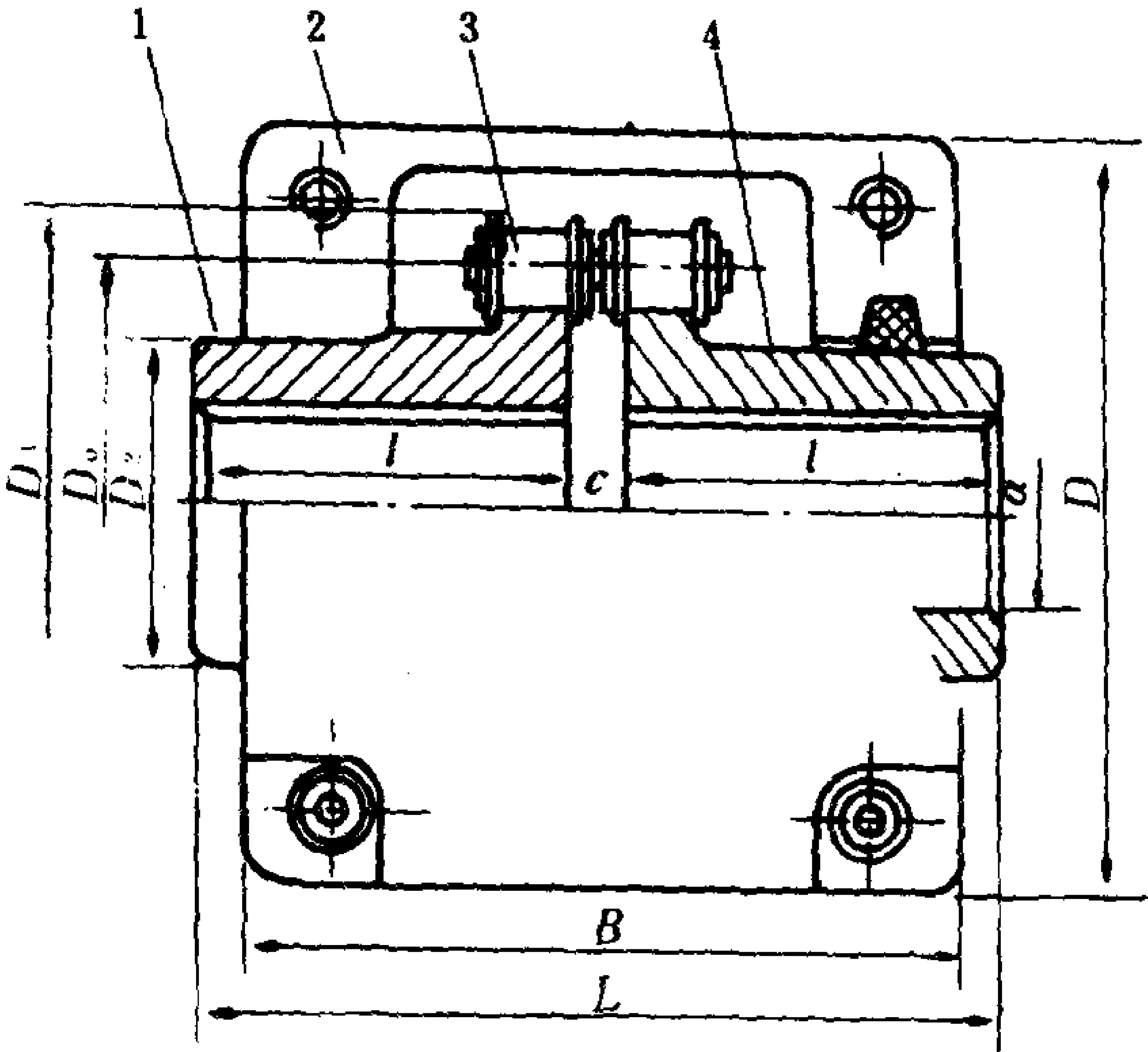


图 1.1.2-52 链条联轴器

10.3.4 链条联轴器

链条联轴器主要由链条 3 和两个具有链轮的半联轴器 1、 4 及罩壳 2 所组成（图 1.1.2-52)。链条采用双列套筒滚子链，亦可采用单列套筒滚子链或齿形链。这种联轴器结构简单，工作可靠，重量轻，更换方便，但不宜用于立轴的联接。联轴器的转速限制在外缘速度$v<10$ m/s。其径向位移$y\leq 0.02p$（p为链条节距mm)，角位移$\alpha<1^\circ$。该联轴器已有规格尺寸，设计时先按轴径d从表 1.1.2-94 中初步选一规格尺寸，然后验算链条销轴的剪应力。其许用剪应力 $[\tau]=(160\sim180)K_V$MPa，式中K_V是考虑离心力影响系数，其值见表 1.1.2-95。

表 1.1.2-94　　　　　　　　双列链链条联轴器（图 1.1.2-52）

型号	d		l				d_2	D_1	C	D	B	链条		链轮		总质量	链条破坏载荷
	min	max	一般轴用		电动机轴用							销轴直径	节距	分度圆直径	齿数		
			min	max	min	max						d_z	p	D_0	Z	kg	kN
LT1	12	22	25	40	30	50	35	61	7.4	75	71	4.55	12.70	49.07	12	0.8	13.9
LT2	16	30	30	60	40	80	50	77		90				65.10	16	1.4	
LT3	16	38	30	60	40	80	60	96	9.7	109	81	5.08	15.875	81.37	16	2.6	21.7
LT4	20	45		80	50	110	70	106		119				91.42	18	3.5	
LT5	22	55	30	80	50	110	85	127	11.6	141	100	5.95	19.05	109.71	18	6.0	31.4
LT6	25	75	40	110	60	140	110	151		166				133.86	22	9.5	
LT7	30	80	50	140	80	170	115	169	15.3	185	124	7.94	25.40	146.27	18	14	55.4
LT8	35	95					140	202		218				178.48	22	20	
LT9	40	110	60	170	110	210	160	232	18.8	248	144	9.52	31.75	202.96	20	34	86.8
LT10	50	120	60	170	110	210	170	254	22.8	282	185	11.11	38.10	219.41	18	50	125
LT11	60	150	80	210	140	250	210	302		330				267.71	22	65	
LT12	70	160	80	210	140	300	220	341	30.1	380	234	14.30	50.80	292.55	18	122	223
LT13	80	200	110	250	170	350	280	405		440	240			356.95	22	185	
LT14	90	200	110	250	170	350	295	424	37.6	470	270	19.84	63.50	365.97	18	288	347
LT15	100	220	140	300	210		375	505		550				446.54	22	334	

注：半联轴器通常用 45 号钢表面淬火或 20 Cr表面渗碳淬火，HRC=40～45。

表 1.1.2-95　　　　　　　　**离心力影响系数K_V**

链轮转速 rpm	<50	50	100	500	1000	1500	2000	3000
K_V	1.15	1.00	0.69	0.27	0.23	0.22	0.20	0.16

10.3.5 弹性圆柱销联轴器

弹性圆柱销联轴器的构造与凸缘联轴器相似，只是用套有弹性圈的柱销代替了联接螺栓（图 1.1.2-53）。它靠弹性圈的变形来补偿两轴间的偏移，而且还可缓和冲击和吸收振动。

因尺寸而异，该联轴器允许的最大轴向位移$x=2\sim7.5\,mm$；允许最大的径向位移$y=0.4\sim0.7\,mm$；允许最大的角位移$\alpha=1^\circ$。

制造联轴器的材料是：半联轴器—铸铁(有时也采用 30 号锻钢或 35 号铸钢)；柱销—45 号锻钢，正火处理；弹性圈—橡胶；挡圈—A1号钢。该联轴器已有标准（原第一机械工业部标准)，设计时先按计算扭矩T_C、轴径d和转速n从表 1.1.2-96 中选一型号，重要场合还在验算弹性圈与孔壁间的比压p和柱销的弯曲应力σ_b。即：

$$p=\frac{2\,T_c}{D_1 Z\,d_4\,(l-c)}\leq 2\,\text{MPa} \qquad (1.1.2\text{-}27)$$

$$\sigma_b=\frac{10\,T_c\,l}{D_1 Z\,d_4^3}\leq 0.25\,\sigma_s \qquad (1.1.2\text{-}28)$$

式中σ_s为柱销材料的屈服限，MPa。其它符号见表 1.1.2-96。



图 1.1.2-53　弹性圆柱销联轴器

表 1.1.2-96　**弹性圆柱销联轴器**（JB108—60）

型号	轴孔直径 d_I, d_{II} 最小	最大 $d_I(J,Z)$ $d_{II}(Y,J,Z)$	最大 $d_I(Y)$	D	D_1	D_2	D_3 $D_{3I}(J,Z)$ $D_{3II}(Y,J,Z)$	D_3 $D_{3I}(Y)$	L 一般轴用	L 电机轴用	l	l_1	l_2	l_3	d_2	d_3	柱销 d_4	柱销数目 Z	$B\geq$	装配间隙 c	转动惯量 kg·m²	质量 kg	许用扭矩 N·m	许用转速 r/min
标准型																								
B1	25	28	32	120	82	112	52	55	50	60	33	33	35	18	28	40	14	4	42	1～5	0.0072	4.71	128	4700
B2	30	38	42	140	100	130	70	72	60	80	33	33	35	22	28	52	14	6	42	1～5	0.014	7.46	235	4000
B3	35	45	50	170	120	158	80	85	70	110	42	42	45	26	36	62	18	6	55	2～6	0.039	14.01	466	3300
B4	40	55	60	190	140	178	100	105	90	110	42	42	45	26	36	75	18	8	55	2～6	0.064	18.57	7.25	3000
B5	45	65	75	220	170	208	120	130	110	140	42	42	45	32	36	95	18	10	55	2～6	0.126	29.2	1100	2600
B6	50	75	85	260	195	245	130	150	130	140	52	58	55	32	46	110	24	10	70	2～8	0.277	43.12	2060	2200
B7	70	95	105	330	245	314	175	185	160	170	66	75	70	36	58	130	30	10	85	2～10	0.983	89.58	4120	1700
B8	80	120	135	410	310	390	220	230	210	210	84	90	90	42	72	165	38	10	110	2～12	2.82	172.5	8480	1400
B9	100	150	170	500	380	475	270	290	250	250	103	110	110	46	88	200	46	10	130	2～15	7.5	308.2	15380	1100
轻型																								
Q1	25	28	32	105	75	98	52	55	50	60	19	26	22	18	20	40	10	6	28	1～4	0.003	2.94	67	5400
Q2	30	38	42	120	92	114	70	72	60	80	19	26	22	22	20	52	10	8	28	1～4	0.0065	5.00	110	4700
Q3	35	45	50	145	115	138	80	85	70	110	19	26	22	26	20	62	10	10	28	1～4	0.0147	8.48	172	3900
Q4	40	55	60	170	132	162	100	105	90	110	33	33	35	26	28	75	14	10	42	1～5	0.038	14.33	310	3300
Q5	45	65	75	200	160	190	120	130	110	140	33	33	35	32	28	95	14	10	42	1～5	0.1	24.27	627	2800
Q6	50	75	85	240	190	228	135	150	130	140	42	42	45	32	36	110	18	10	55	2～6	0.186	35.45	1230	2350
Q7	70	95	105	290	240	278	175	185	160	170	42	42	45	36	36	130	18	12	55	2～6	0.474	63.34	1866	1950
Q8	80	120	135	350	280	335	220	230	210	210	52	58	55	42	46	165	24	12	70	2～8	1.321	117.7	3610	1600
Q9	100	150	170	440	355	425	270	290	250	250	66	75	70	46	58	200	30	12	85	2～10	4	220.1	7160	1300

注：（1）表中各尺寸的符号见图 1.1.2-53；（2）半联轴器 I 应尽可能作为主动用；

（3）短期过载不应超过许用扭矩的两倍；（4）表中转动惯量和质量，按铸铁制的联轴器 I 结构形式计算。

10.3.6 轮胎联轴器

如图 1.1.2-54 所示，它由两个半联轴器 1 分别用键与轴连接，3 为橡胶制成的一个特型轮胎，用压板 2 及螺钉把轮胎 3 紧压在左右两个半联轴器上，通过轮胎来传递扭矩，因此它也是一种弹性可移式联轴器。它的结构简单可靠，易于变形，因此允许的相对位移较大，其许用相对径向位移$y=0.1D$（D为联轴器外径mm）；许用相对轴向位移$x=0.02D$；许用相对角位移$\alpha=5\sim12^{\circ}$；两个半联轴器相对扭转角$\theta\leq6\sim30^{\circ}$。

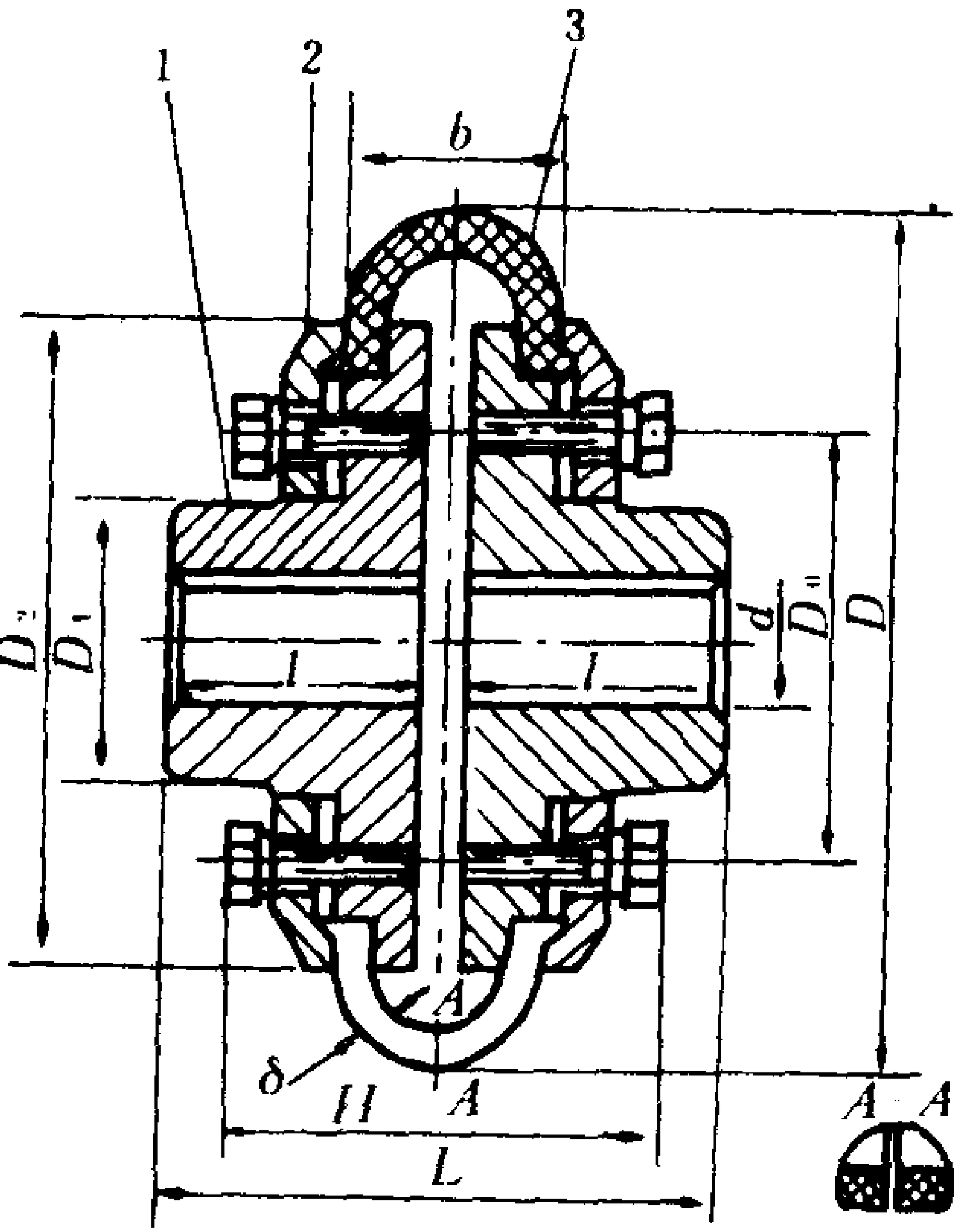


图 1.1.2-54 轮胎联轴器

轮胎联轴器已有规格尺寸，设计时先按计算扭矩T_C、轴径d和转速n从表 1.1.2-97 中选一规格尺寸，然后验算轮胎的剪应力。

$$\tau=\frac{2T_C}{\pi D_2^2\delta}\leq0.4\,\mathrm{MPa} \qquad (1.1.2\text{-}29)$$

式中各符号见表 1.1.2-97。

表 1.1.2-97 **轮胎联轴器（图 1.1.2-54）**

型号	许用扭矩 N·m		许用转速 r/min	许用角位移 α	D	d		L	l		D_0	H	D_1	D_2	b	δ	质量 kg	转动惯量 kg·m²
	正常	最大				孔胚	最大		最小	最大								
RF-100	10	30	4000	7°	100	10	22	70～110	30	50	48	62	34	80	36	8	1.6	0.001
RF-135	30	80	4000	6°	135	16	30	94～134	40	60	68	80	48	110	46	10	4	0.004
RF-180	50	150	3000	5°	180	23	35	140～180	60	80	90	102	64	140	60	12	8.5	0.016
RF-210	100	300	3000	5°	210	28	50	186～246	80	110	105	125	75	158	74	14	14	0.034
RF-265	250	750	2000	6°	265	33	60	252～312	110	140	140	148	95	205	88	16	28	0.112
RF-310	400	1250	2000	6°	310	36	70	316～366	140	165	166	164	110	240	98	18	47	0.23
RF-400	900	2750	1600	5°	400	40	90	374～464	165	210	230	195	150	320	118	22	98	0.85
RF-450	1600	5000	1250	12°	450	55	110	280	125		260	190	180				96	1.22
RF-550	3200	10000	1000	12°	550	90	140	360	150		280	280	210				168	3
RF-700	6500	20000	800	9°	700	100	180	450	185		360	365	270				320	9
RF-950	16000	50000	600		950	125	225	590	235		500	508	380				750	43.5
RF-1270	30000	100000	450		1270	150	300	850	325		610	725	480				1600	162.5

注：（1）半联轴器材料为 45 号钢，压板为 35 或 45 号钢；

（2）表中最大许用扭矩乃瞬时最大扭矩，选择时应以正常许用扭矩为准。

10.3.7 高弹性橡胶联轴器

如图 1.1.2-55 所示，它由联接盘 1、外限制盘 2、橡胶组合环 3、内限制盘 4 和联接凸橡 5 所组成。橡胶组合环是将橡胶弹性环硫化在两个金属盘上，为了增大粘结面积，橡胶与金属盘接触面呈锥形。这种联轴器通过橡胶组合环来传递扭矩，具有高的弹性和良好的减振性能，也是一种弹性可移式联轴器，其许用相对径向位移$y=1.2\sim6.2\,\mathrm{mm}$；许用相对轴向位移$x=0.7\sim3.5\,\mathrm{mm}$；许用相对角位移$\alpha=3.2^{\circ}$。该联轴器适用于内燃机等冲击较大的两轴联接，目前已有系列产品，主要尺寸见表 1.1.2-98。

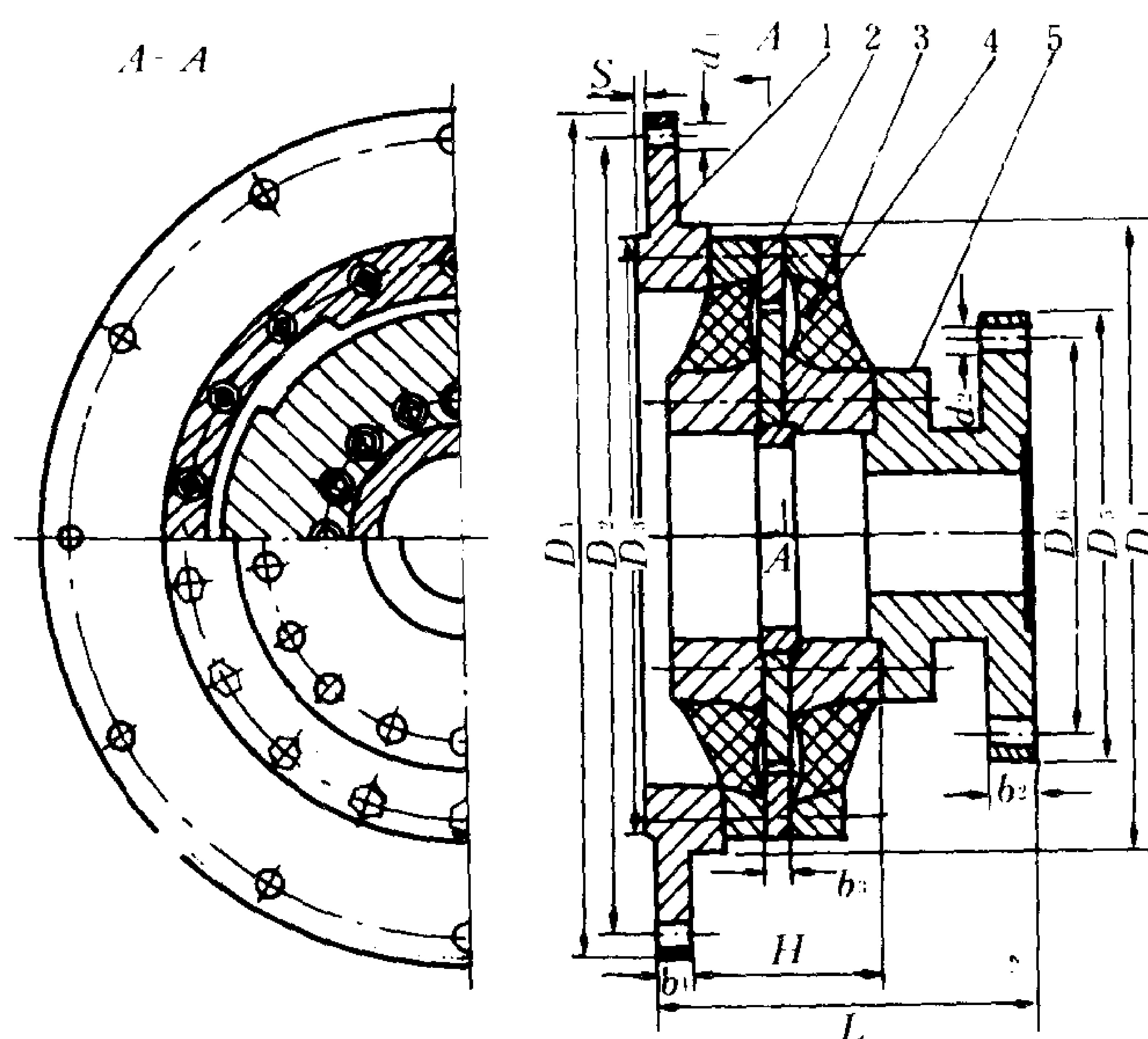


图 1.1.2-55　高弹性橡胶联轴器

表 1.1.2-98　**高弹性橡胶联轴器的主要尺寸和特性参数**

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	H	L	b_1	b_2	b_3	S	螺栓孔				许用扭矩 N·m	瞬时最大扭矩 N·m	许用转速 r/min
												d_1	数目	d_2	数目			
295	275	240	250	150	130	85	140	10	12	10	5	12	12	11	12	700	1750	4000
335	315	275	285	170	145	100	160	10	15	10	5	12	16	13	12	1100	2750	3800
390	365	320	330	190	165	110	190	12	20	10	5	12	16	13	12	1800	4500	3500
440	415	370	380	210	180	130	215	15	20	15	5	14	16	17	12	2800	7000	3000
490	465	410	420	250	210	150	250	15	25	15	5	14	16	17	12	4000	10000	2800
530	500	450	460	290	240	170	280	15	30	20	5	14	24	17	16	5500	13750	2500
600	565	510	520	320	270	180	295	15	30	20	5	18	16	21	12	7500	18750	2200
680	640	580	595	380	320	205	335	20	35	25	10	18	24	21	16	11000	27500	1950
810	770	690	705	450	400	245	385	25	35	30	10	22	16	25	12	18000	45000	1650
860	820	750	765	480	430	265	415	25	40	30	10	22	24	25	16	24000	60000	1500
950	900	820	835	530	460	285	445	30	40	35	10	26	16	31	12	30000	75000	1400
1000	950	870	885	570	500	315	485	30	45	40	10	26	24	31	16	39000	97500	1300
1120	1060	970	985	600	520	350	550	30	50	45	10	32	16	37	16	54000	135000	1200
1200	1140	1030	1050	650	570	405	655	40	60	45	10	32	24	37	16	70000	175000	1100
1290	1220	1100	1120	700	620	465	785	50	80	50	10	38	16	49	16	90000	225000	1000

注：各主要零件的材料为 45 号钢，橡胶弹性环为天然橡胶邵氏硬度A52—60。

10.4　离合器

离合器的特点及应用如表 1.1.2-88 所述，下面介绍几种常见的离合器。

10.4.1　牙嵌离合器

牙嵌离合器是由两个端面都具有凸牙和凹槽的半离合器组成(图 1.1.2-56)。其中一个半离合器固定在主动轴上，另一个半离合器用导键（或花键）与从动轴联接，并由操纵机构使其作轴向移动，以实现离合器的分离与接合。它是借每个凸牙都嵌在对应的半离合器的凹槽内来传递运动和扭矩的。为了使两个半离合器能够对中，在主动轴端的半离合器上固定一个对中环，从动轴可在对中环内自由转动。

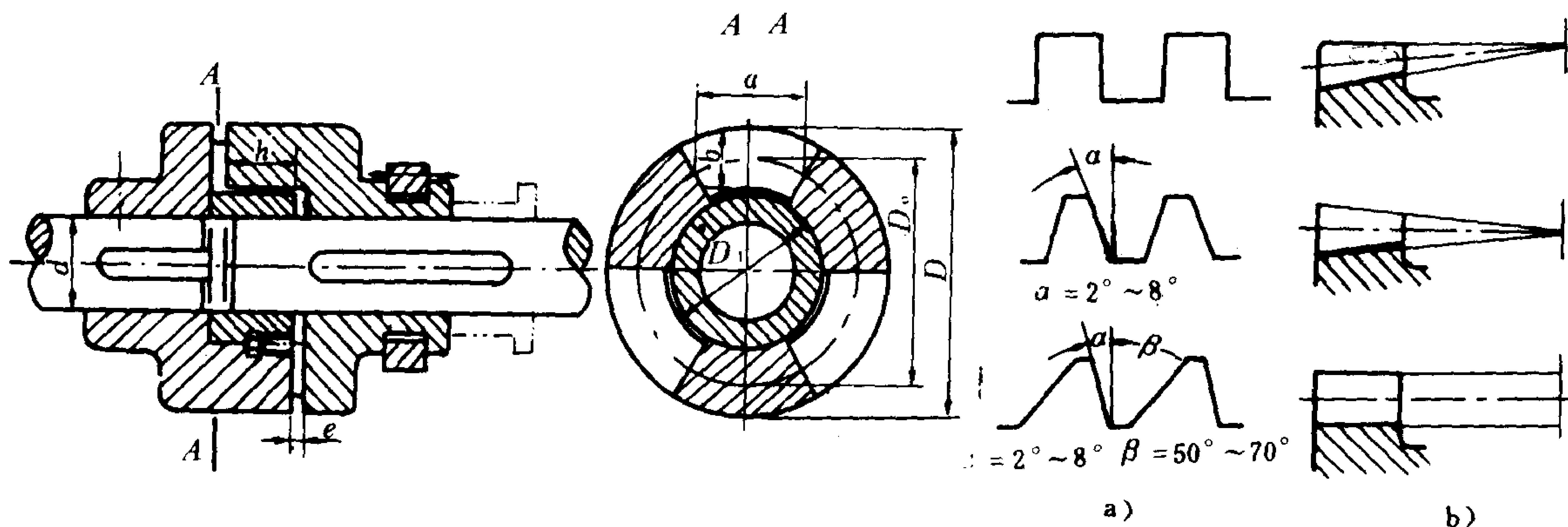


图 1.1.2-56 牙嵌离合器

图 1.1.2-57 牙嵌离合器的牙型

牙嵌离合器常用的牙形有矩形、梯形和锯形(图 1.1.2-57)。矩形牙无轴向分力，但不便于接合与分离，而且磨损后无法补偿牙侧间隙；梯形牙的强度高，能传递较大的扭矩，且能自动补偿牙磨损后的侧隙，从而可避免在载荷和速度变化时因间隙而产生的冲击，故使用较广；锯形牙强度最高，但只能传递单向扭矩，只能用于特定的工作条件处。牙嵌离合器的牙数一般为 3 ～60。要求传递扭矩愈大，选用的牙数应愈少；要求接合时间愈短，选用牙数应愈多。牙数愈多，各牙分担的载荷愈不均匀。

牙嵌离合器一般用于低速接合处。材料常用低碳钢表面渗碳淬火，硬度达到HRC＝56～62；或采用中碳钢表面淬火，硬度为HRC＝48～54；不重要和在静止时接合的离合器，也允许采用HT 20—40。

牙嵌离合器的有关尺寸可从有关手册中选取，必要时应按下式验算牙面上的比压p及牙根弯曲应力σ_b。

$$p=\frac{2T_C}{D_0ZA}\leq[p] \tag{1.1.2-30}$$

$$\sigma_b=\frac{T_C\cdot h}{WD_0Z}\leq[\sigma]_b \tag{1.1.2-31}$$

式中：A——每个牙的接触面积，mm^2；

D_0——离合器牙的平均直径（图 1.1.2-56），mm；

h——牙的高度，mm；

Z——牙的数目；

W——牙根处的弯曲剖面模量，$W=\frac{a^2b}{6}$，其中a、b如图 1.1.2-56 所示；

$[p]$——许用比压，停车时接合$[p]\leq90\sim120$ MPa；低速下接合$[p]\leq50\sim70$

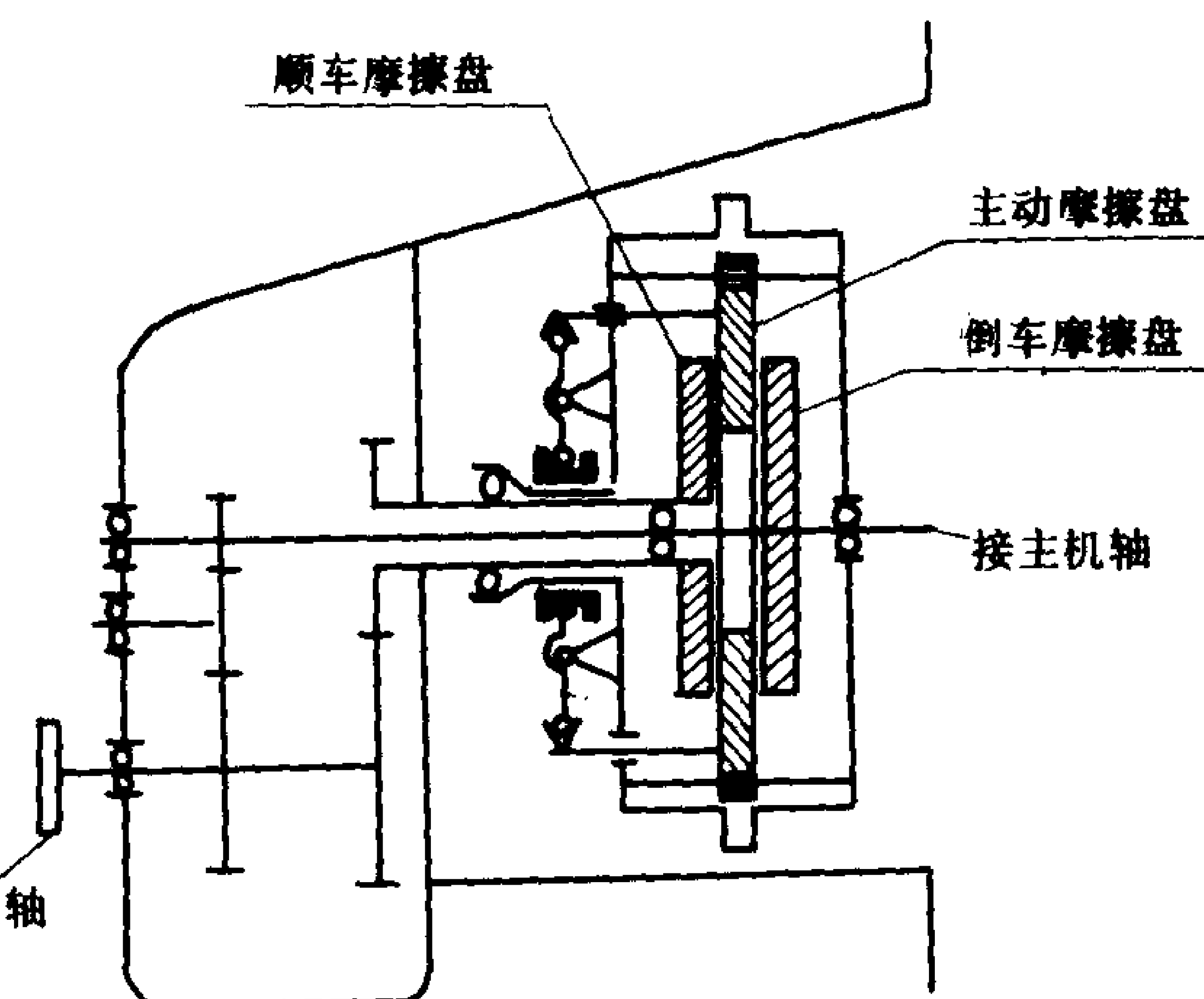


图 1.1.2-58 船用倒顺车单盘摩擦离合器

MPa；高速下接合 $[p]=35\sim45$ MPa；

$[\sigma]_b$——许用弯曲应力，停车时接合 $[\sigma]_b=\frac{\sigma_s}{1.5}$ MPa；运转时接合 $[\sigma]_b=\frac{\sigma_s}{5\sim6}$ MPa。

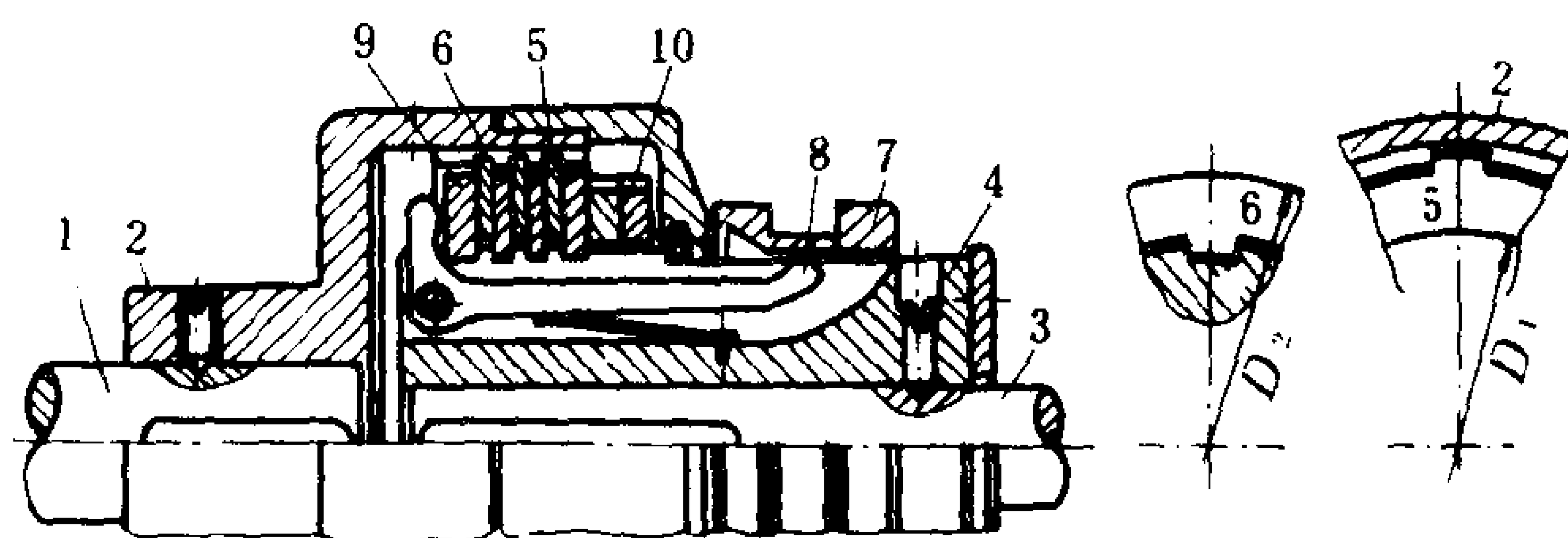


图 1.1.2-59 多盘摩擦离合器

1-主动轴；2-鼓轮；3-从动轴；4-套筒；5-外摩擦盘组；6-内摩擦盘组；7-滑环；8-曲臂压杆；9-压板；10-调节螺母

10.4.2 圆盘摩擦离合器

圆盘摩擦离合器是靠主、从动盘的接触面间产生的摩擦力矩来传递扭矩的，它与牙嵌式离合器相比较，且有下列特点：1）两轴可在任何转速下进行联接，且接合平稳，冲击和振动较小；2）改变摩擦面间的压力就能调节从动轴的加速时间；3）过载时将发生打滑，可使其他零件免受损坏。它有单盘式和多盘式两种。

图1.1.2-58为船用倒顺车单盘摩擦离合器的示意图。当主动摩擦盘分别与倒、顺摩擦盘接触时，就可控制螺旋桨正反转。图1.1.2-59为多盘摩擦离合器。主动轴1与鼓轮2相联接，从动轴3与套筒4相联接。它有两组摩擦盘，外摩擦盘组5与鼓轮，内摩擦盘组6与套筒，分别采用类似导向花键的联接。滑环7由操纵机构控制，当左移时，压下曲臂压杆8使内、外摩擦盘相互压紧，离合器接合。当滑环右移时，曲臂压杆被弹簧抬起，内、外摩擦盘分开，离合器分离。

圆盘式摩擦离合器的设计计算见表1.1.2-99，摩擦盘常用材料及其性能见表1.1.2-100。

表 1.1.2-99 **圆盘式摩擦离合器的设计计算**

计算项目	计算公式	说明
（1）外盘内径 D_1 内盘外径 D_2	在油中工作的离合器 $D_1=(1.5\sim2)d$，$D_2=(1.5\sim2)D_1$ 在干摩擦下工作的离合器 $D_1=(2\sim3)d$，$D_2=(1.5\sim2.5)D_1$	d——轴径
（2）轴向推力 Q	$Q=\frac{\pi}{4}(D_2^2-D_1^2)[p]$ 许用压强 $[p]=[p]_0K_a$、K_b、K_c	$[p]_0$——基本许用压强，查表 1.1.2-100 K_a、K_b、K_c——系数，查表 1.1.2-101
（3）所需的摩擦接触面数目 Z	$Z=\frac{4T_c}{Qf(D_1+D_2)}=$（内盘数目＋外盘数目）－1	f——摩擦系数，查表 1.1.2-100 算出的 Z 不能过多，否则将影响离合器分离的灵活性，故应使 $Z\leq25\sim30$

表 1.1.2-100 **摩擦离合器的材料及其性能**

摩擦副的材料及工作条件		摩擦系数 f	$[p]_0$ MPa
在油中工作	淬火钢对淬火钢	0.06	0.6～0.8
	淬火钢对青铜	0.08	0.4～0.5
	铸铁对铸铁或淬火钢	0.08	0.6～0.8
	钢对夹布胶木	0.12	0.4～0.6
	淬火钢对陶质金属	0.10	0.8
不在油中工作	压制石棉对钢或铸铁	0.30	0.2～0.3
	淬火钢对陶质金属	0.40	0.3
	铸铁对铸铁或淬火钢	0.15	0.2～0.3

注：基本许用压强 $[p]_0$ 是在平均圆周速度为 2.5 m/s、主动摩擦盘数目为 3 和每小时接合次数为 90 下得出的。

表 1.1.2-101　　**系数K_a、K_b、K_c值**

平均圆周速度m/s	1	2	2.5	3	4	6	8	10	15
K_a	1.35	1.08	1	0.94	0.86	0.75	0.68	0.63	0.55
主动摩擦盘数目	3	4	5	6	7	8	9	10	11
K_b	1	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.82	0.79	0.76

每小时接合次数	90	120	180	240	300	≥360
K_c	1	0.95	0.8	0.7	0.6	0.5

10.4.3 圆锥摩擦离合器

图 1.1.2-60 为圆锥摩擦离合器简图，有单圆锥式和双圆锥式两种。主动轴 1 与具有内圆锥面的轮子 2 相固接，从动轴 3 则与具有外圆锥面的轮子 4 用花键或导键相联接，靠楔形摩擦来传递扭矩。双圆锥式有两个楔形摩擦面，所以传递扭矩可增大一倍。

圆锥摩擦离合器由于利用了楔形增压原理，它与单盘离合器比较，可以用较小的轴向力传递较大的扭矩，但与多盘式离合器相比，由于它最多只能有两个摩擦面，所以径向尺寸远不如多盘式紧凑。为了便于分离，其锥顶半角α不能太小，当摩擦副材料为金属对金属时，$\alpha>6^\circ\sim7^\circ$；皮革对金属时，$\alpha>12^\circ$。

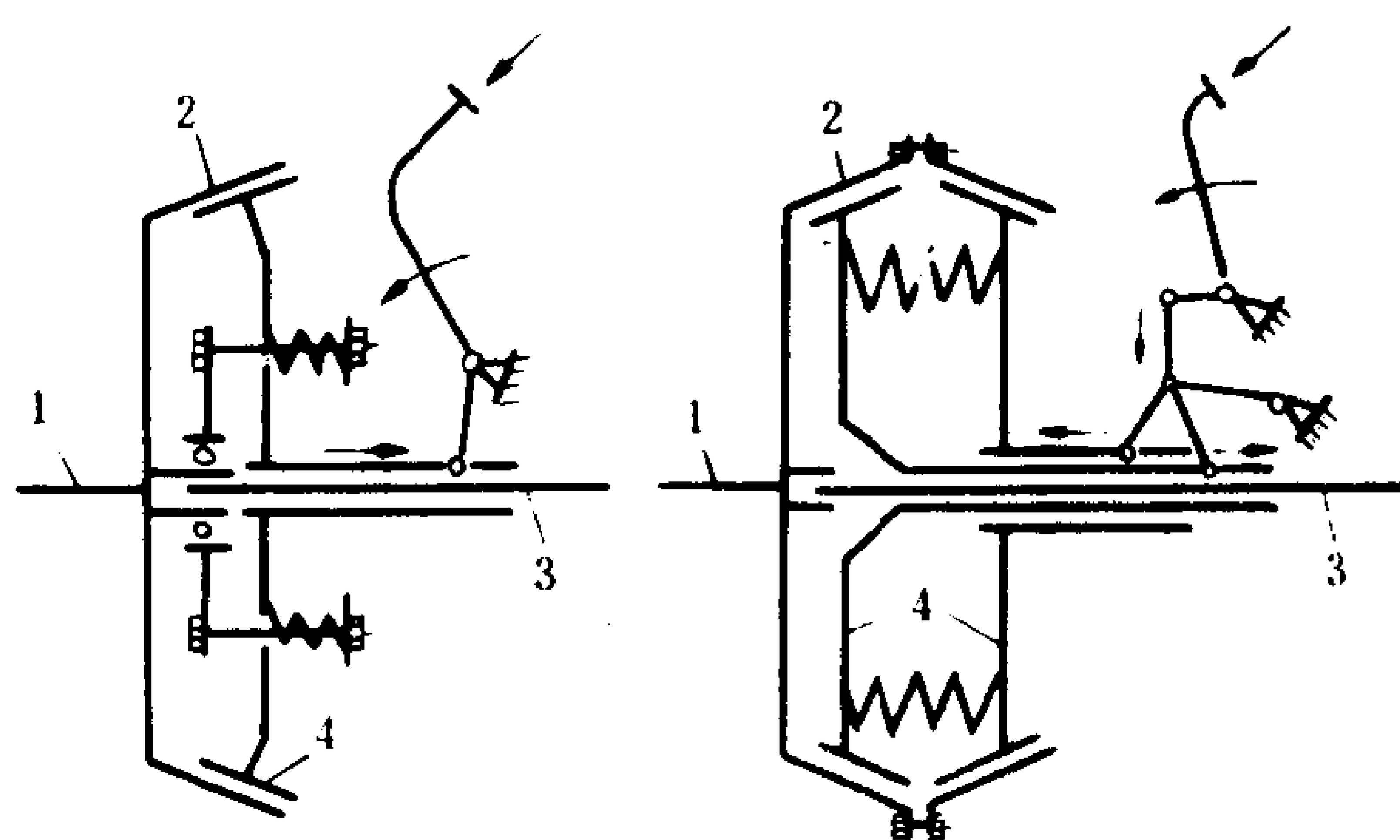


图 1.1.2-60　圆锥式摩擦离合器

10.4.4 电磁粉末离合器

电磁粉末离合器简称磁粉离合器。图 1.1.2-61为该离合器的原理图。金属外筒 1 为从动件，嵌有环形励磁线圈 3 的电磁铁 4 与主动轴联接，1 与 4 间留有少量间隙，一般为1.5～2 mm，内装适量的铁和石墨的粉末，称为干式；若采用羰基化铁加油作为工作介质，则称为油式或湿式。当励磁线圈中无电流时，离合器处于分离状态，因此时磁粉被离心力甩在圆筒内壁，疏松且散开，不阻碍主、从动件之间的相对运动。当通入电流时(通常为直流电)，电磁粉末即在磁场作用下被吸引而聚集，从而将主、从动件联接起来，依靠磁粉的结合力和磁粉与工作面间的摩擦力来传递扭矩。该离合器的励磁电流I与扭矩T之间呈线性关系。改变励磁电流就可以获得不同的扭矩，因此扭矩调节简单而且精确，调节范围也宽。此外，操纵方便、离合平稳、工作可靠，但重量较大。

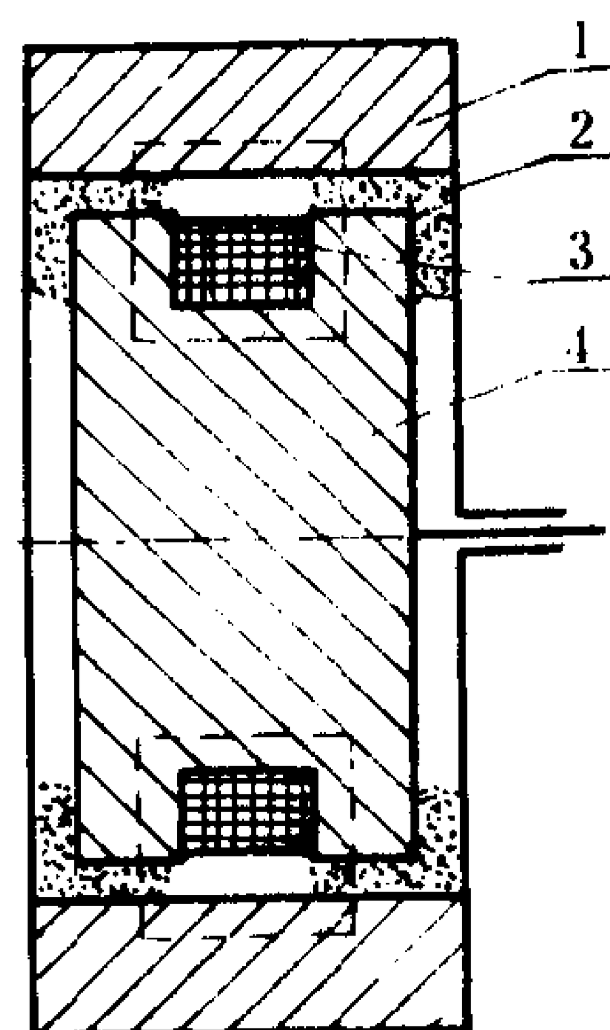


图 1.1.2-61　电磁粉末离合器

10.4.5 定向离合器

图 1.1.2-62 为滚柱式定向离合器。它由轮心 1、套筒 2、滚柱 3 和弹簧顶杆 4 等组成。如果轮心为主动件，它的旋转方向如图中箭头所示，那末，这时滚柱将被楔紧在槽内，因而套筒将随轮心一同回转，离合器即处于联接状态。但当轮心反向旋转时，滚柱即被滚到槽的宽敞部分，从动套筒即不再随轮心转动，这时离合器

即处于分离状态。

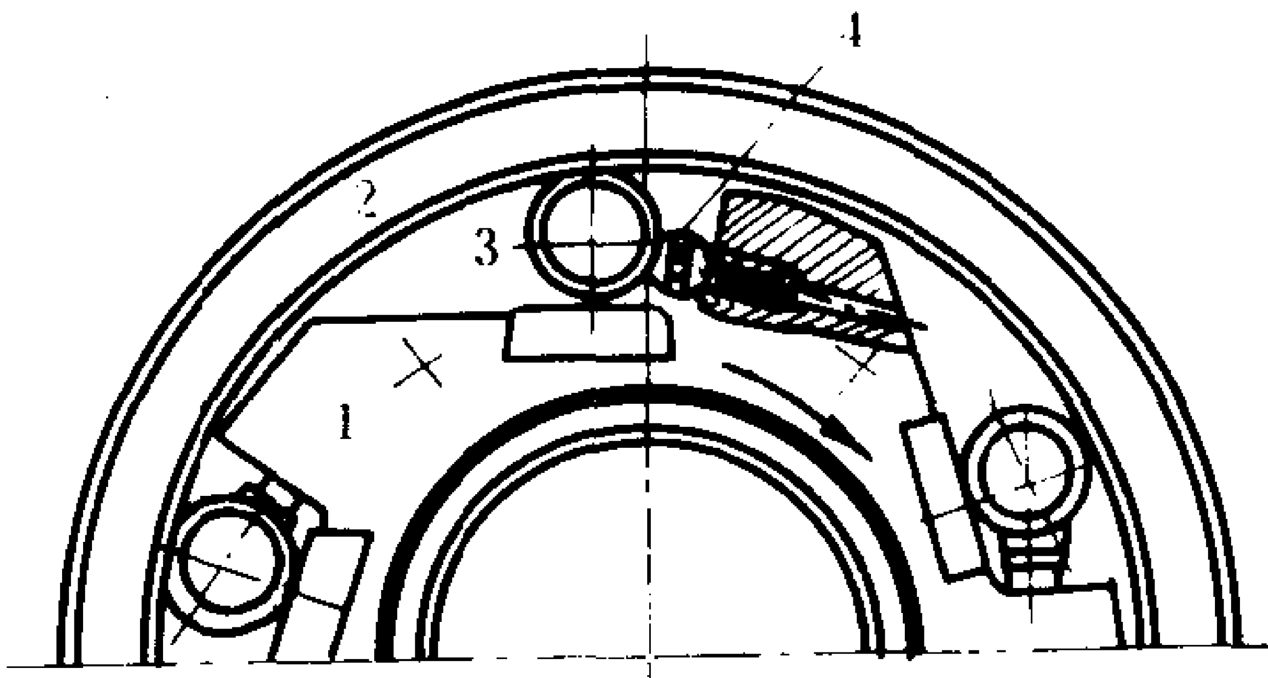


图 1.1.2-62　滚柱式定向离合器

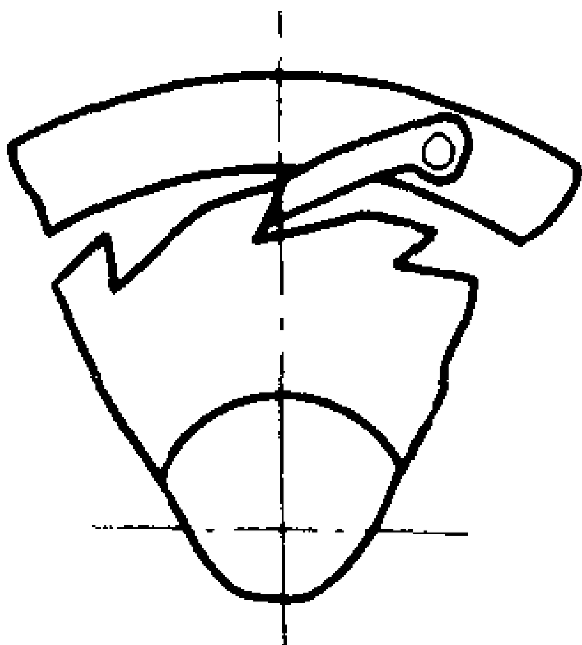
制造滚柱式定向离合器的材料常用的是轴承钢或渗碳钢，表面硬度为HRC≥60。滚柱数目一般为3～4个，滚柱尺寸一般取为：直径 $d\approx\frac{1}{8}D$，长度 $l\approx1.5d$，D—套筒内径。滚柱数目愈多，尺寸愈大，离合器所能传递的扭矩也愈大。与滚柱接触的两接触点的切线所形成的夹角 α 称为楔角，α 太大将不能楔紧滚柱，α 太小会使楔紧的滚柱不易松开。在现有的结构中，一般取 $\alpha\approx3\sim6°$。

滚柱式定向离合器的强度计算主要是校核接触处的接触压应力 σ_H，使其小于许用值。

图 1.1.2-63 为棘爪—棘轮机构的定向离合器。该定向离合器构造简单，对制造精度要求较低，在速度较低的传动中应用很广。

11　弹簧

11.1　弹簧的功用和类型


图 1.1.2-63
棘爪—棘轮定向离合器

弹簧是一种弹性元件，它受外力作用后能产生较大的弹性变形，卸载后又能立即恢复原状。弹簧的主要功用是：（1）控制机构的运动，例如内燃机的阀弹簧、离合器和调速器中的控制弹簧；（2）吸收振动和冲击能量，例如车辆中的缓冲弹簧、各种缓冲器和弹性联轴器中的吸振弹簧；（3）储存能量，例如钟表中的弹簧；（4）测量力的大小，例如测力器和弹簧秤中的弹簧等等。

弹簧的种类很多，从外形看，有螺旋弹簧、板弹簧、盘簧、碟形弹簧和环形弹簧等。按照受力的性质，又可分为拉伸弹簧、压缩弹簧、扭转弹簧和弯曲弹簧等。表 1.1.2-102 列出了弹簧的基本类型。

表 1.1.2-102　　**弹簧的基本型式**

按载荷分 / 按形状分	拉　伸	压　缩		扭　转	弯　曲
螺旋形	圆柱形拉伸螺旋弹簧	圆柱形压缩螺旋弹簧	圆锥形压缩螺旋弹簧	圆柱形扭转螺旋弹簧	—

续上表

按载荷分 / 按形状分	拉伸	压缩		扭转	弯曲
其他形		环形弹簧	碟形弹簧	盘簧	板簧

螺旋弹簧是用弹簧丝卷绕制成，由于制造简便，应用最广。

环形弹簧和碟形弹簧能承受很大的冲击载荷，并具有良好的吸振能力，所以常用作缓冲装置。

盘簧用于受扭矩不大而又要求轴向尺寸很小的场合，在各种仪器和钟表中广泛地用作储能装置。

板簧是由许多长度不同的钢板叠合而成，主要用于各种车辆的减振装置。

11.2 普通圆柱螺旋弹簧的型式、代号和尺寸参数系列

表 1.1.2-103　　弹簧的典型端部结构型式及代号(GB1239—76)

类型	简图	端部结构	代号
压缩弹簧（Y）		两端圈并紧并磨平	YⅠ
		两端圈并紧不磨或磨平（热卷弹簧）	YⅡ
		两端圈并紧不磨	YⅢ
		两端圈不并紧	YⅣ

续上表

类型	简图	端部结构	代号
拉伸弹簧(L)		半圆钩环	L I
		圆钩环	L II
		圆钩环压中心	L III
		偏心圆钩环	L IV
		长臂半圆钩环	L V
		长臂小圆钩环	L VI
拉伸弹簧(L)		可调式	L VII
		两端具有可转钩环	L VIII

续上表

类型	简图	端部结构	代号
扭转弹簧(N)		内臂扭转弹簧	N I
		外臂扭转弹簧	N II
		中心臂扭转弹簧	N III
		双扭簧	N IV

注：GB1239—76适用于冷卷与热卷，压缩、拉伸和扭转的圆剖面圆柱螺旋弹簧。弹簧材料剖面直径为0.5～50 mm。

表1.1.2-104　　普通圆柱螺旋弹簧尺寸参数系列（GB1358—78）

弹簧材料剖面直径 d,mm	第一系列	0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.6 0.8 1 1.2 1.6 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 6 8 10 12 16 20 25 30 35 40 45 50 60 70 80
	第二系列	0.7 0.9 1.4 (1.5) 1.8 2.2 2.8 3.2 3.8 4.2 5.5 7 9 14 18 22 (27) 28 32 (36) 38 42 55 65
弹簧中径 D_2 mm	第一系列	0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.2 1.6 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 6 7 8 9 10 12 16 20 25 30 35 40 45 50 55 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 180 200 220 240 260 280 300 320 360 400
	第二系列	1.4 1.8 2.2 2.8 3.2 3.8 4.2 4.8 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 14 18 22 28 32 38 42 48 52 58 65 75 85 95 105 115 125 135 145 170 190 210 230 250 270 290 340 380 450
有效圈数n圈	压缩弹簧	2 2.25 2.5 2.75 3 3.25 3.5 3.75 4 4.25 4.5 4.75 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 9 9.5 10 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15 16 18 20 22 25 28 30
	拉伸弹簧	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 22 25 28 30 35 40 45 50 55 60 65 70 80 90 100
自由高度 H_0 mm	压缩弹簧（推荐选用）	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 22 24 26 28 30 32 35 38 40 42 45 48 50 52 55 58 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 130 140 150 160 170 180 190 200 220 240 260 280 300 320 340 360 380 400 420 450 480 500 520 550 580 600 620 650 680 700 720 750 780 800 850 900 950 1000

注：1. 上表适用于压缩、拉伸和扭转的圆剖面圆柱螺旋弹簧。
2. 应优先采用第一系列，括号内的尺寸只限于老产品。
3. 拉伸弹簧有效圈数除按表规定外，由于钩环相对位置不同，其尾数还可为0.25、0.5、0.75。

表 1.1.2-105　　弹簧指数C的荐用值

d,mm	0.2～0.4	0.5～1	1.2～2.2	2.5～6	7～16	18～50
$C=\frac{D_2}{d}$	7～14	5～12	5～10	4～9	4～8	4～6

C值越小，弹簧内外侧的应力差越悬殊，材料利用率也越低，而弹簧刚度亦越大。所以在设计弹簧时，一般规定$C\geq 4$。

11.3 圆柱形螺旋弹簧的制造、材料和许用应力

弹簧制造 圆柱形螺旋弹簧的制造工艺如下：1）卷制；2）挂钩的制作或端面圈的精加工；3）热处理；4）工艺试验及强压处理。

弹簧制造方法有冷卷法和热卷法。弹簧丝直径在 8 mm以下的用冷卷法，在 8 mm以上的用热卷法。冷态下卷制的弹簧多用冷拉的、预先热处理的优质碳素弹簧钢丝，卷成后一般不再经淬火处理，只经低温回火以消除内应力。在热态下卷制的弹簧卷成后必须经过热处理。不论采用冷卷或热卷，卷制后均应视具体情况对弹簧的节距作必要的调整。

表 1.1.2-106　　弹簧材料及许用应力（按GB1239—76）

类别	牌号	许用扭应力 $[\tau]_T$MPa			许用弯曲应力$[\sigma]_b$ MPa		剪切弹性模量G	拉压弹性模量E	推荐硬度	推荐使用温度	特性及用途
		I类	II类	III类	II类	III类	MPa	MPa	HRC	℃	
钢丝	碳素弹簧钢丝 I、II、IIa、III	$0.3\sigma_B$	$0.4\sigma_B$	$0.5\sigma_B$	$0.5\sigma_B$	$0.625\sigma_B$	$0.5\leq d\leq 4$ 83000～80000 $d>4$ 80000	$0.5\leq d\leq 4$ 207500～205000 $d>4$ 200000	—	−40～+120	强度高，韧性好，适用于做小弹簧
	特殊用途弹簧钢丝甲、乙、丙										
	65 Mn										
	60 Si2Mn	471	627	785	785	981	80000	200000	45～50	−40～+200	弹性好，回火稳定性好，易脱碳，用于制造受大载荷的弹簧
	60 Si2MnA										
	60 Si2CrA								47～52	−40～+250	淬透性好，弹性好、回火稳定性好
	70Si3MnA	530	706	883	883	1110			47～52	−40～+200	强度高，易脱碳，有较好的弹性和回火稳定性
	65Si2MnWA	560	745	931	931	1167			47～52	−40～+250	强度高，耐高温，弹性好，淬透性好
	60Si2CrVA										
	50CrVA	442	588	735	735	920			45～50	−40～+210	抗疲劳性好，淬透性和回火稳定性好
	30W4Cr2VA								43～47	−40～+350	高温时强度高，淬透性好

续上表

类别	牌号	许用扭应力 $[\tau]_T$MPa			许用弯曲应力$[\sigma]_b$ MPa		剪切弹性模量G	拉压弹性模量E	推荐硬度	推荐使用温度	特性及用途
		I类	II类	III类	II类	III类	MPa	MPa	HRC	℃	
不锈钢丝	1Cr18Ni9	324	432	540	540	677	73000	197000	—	−250～+300	耐腐蚀，耐高温，适用于做小弹簧
	1Cr18Ni9Ti										
	4Cr13	442	588	735	735	920	75000	187500	48～53	−40～+300	耐腐蚀，耐高温，适用于做大弹簧
青铜线	QSi3—1	270	360	450	450	560	41000	95000	HB 90～100	−40～+120	耐腐蚀性好，有脆裂现象，弹性好，不易热处理，防磁性好
	QSn4—3						40000				
	QBe2	360	450	560	560	750	43000	132000	37～40		耐腐蚀性、防磁性、导电性和弹性均好

注：1．按受力循环次数N不同，弹簧分为三类：I类$N>10^6$；II类$N=10^3\sim10^6$以及受冲击载荷的；III类$N<10^3$。

2．碳素弹簧钢丝按机械性能不同分为I、II、IIa、III四组，I组强度最高，依次为II、IIa、III组。

对于重要的压缩弹簧，为了保证两端的承压面与其轴线垂直，应将端面在专用的磨床上磨平。对于拉伸及扭转弹簧，为了便于联接和加载，两端应制成挂钩或杆臂(见图1.1.2-65)。

弹簧在完成上述工序后，对冷卷弹簧只作回火处理，而热卷弹簧必须按规定技术条件进行淬火处理。

热处理后的弹簧还必须进行工艺试验，以检验弹簧是否合乎技术要求。如再进行一次强压处理，一般可提高承载能力20%。强压处理是使弹簧在超过极限载荷下受载6～48小时，从而使弹簧丝内产生塑性变形和有益的残余应力，以提高弹簧的承载能力。

弹簧的材料和许用应力 弹簧常用的材料及许用应力见表1.1.2-106。

11.4 普通圆柱形压缩（拉伸）螺旋弹簧的设计计算

11.4.1 特性曲线和结构尺寸

设计弹簧时，务必使其工作应力在弹性极限范围内。在这个范围内工作的压缩弹簧，当受轴向载荷F时，弹簧将产生相应的弹性变形，如图1.1.2-64 a)所示。为了表示弹簧的载荷与变形的关系，取纵坐标表示弹簧承受的载荷，横坐标表示弹簧的变形，则载荷和变形成直线关系，如图1.1.2-64 b）所示。这种表示载荷与变形的关系曲线称为弹簧的特性曲线。对拉伸弹簧的特性曲线，如图1.1.2-65所示，其中图b）为无预应力的特性曲线；图c）为有预应力的特性曲线。

图1.1.2-64 a）中的H_0是压缩弹簧在没有承受外力时的自由长度。弹簧在安装时，通常预加一压力F_{min}，使它能可靠地稳定在安装位置上。F_{min}称为弹簧的最小载荷（安装载荷）。在它的作用下，弹簧长度被压缩到H_1，其压缩变形量为λ_{min}。F_{max}为弹簧承受最大工作载荷。在F_{max}作用下，弹簧长度减到H_2，其压缩变形量增到λ_{max}。λ_{max}与λ_{min}的差即为弹簧工作行程

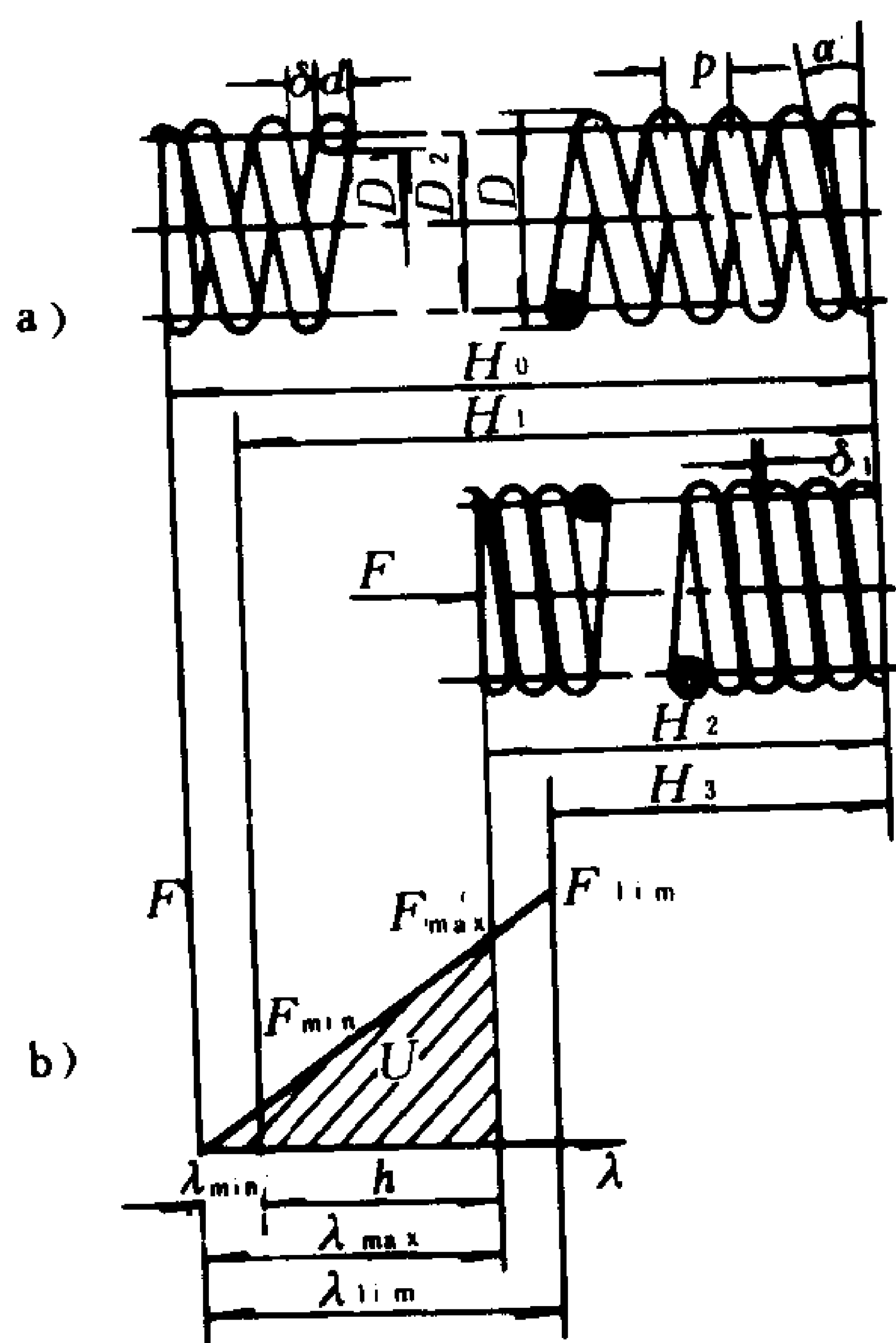


图 1.1.2-64　圆柱形压缩螺旋弹簧的特性曲线

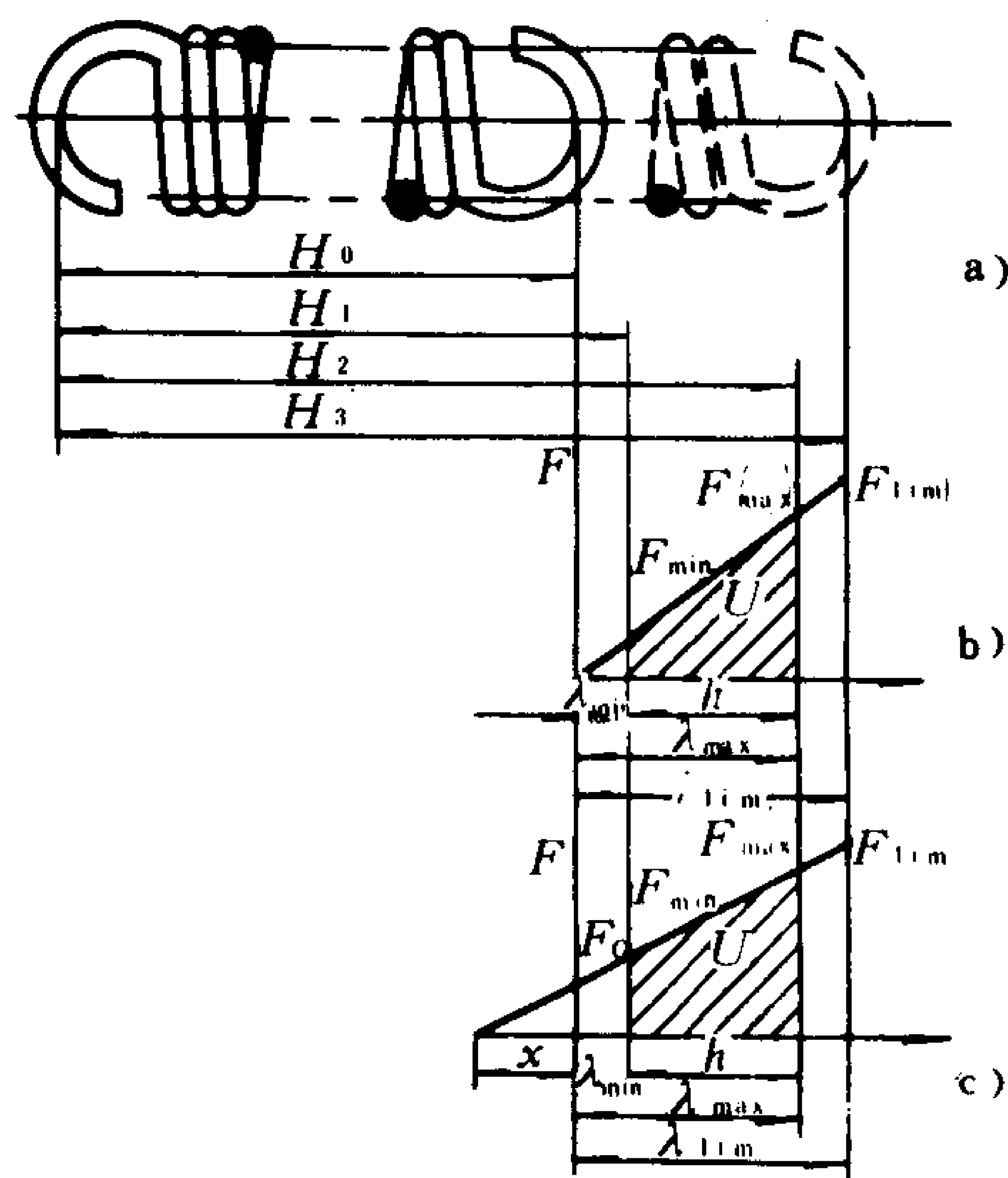


图 1.1.2-65　圆柱形拉伸螺旋弹簧的特性曲线

h，$h=\lambda_{max}-\lambda_{min}$。$F_{lim}$为弹簧极限载荷。在$F_{lim}$作用下，弹簧丝内的应力达到了材料的弹性极限。与$F_{lim}$对应的弹簧长度为 H_3，压缩变形量为λ_{lim}。

等螺距圆柱形压缩螺旋弹簧的特性曲线为一直线，亦即

$$\frac{F_{min}}{\lambda_{min}}=\frac{F_{max}}{\lambda_{max}}=\cdots\cdots=\text{常数}$$

压缩弹簧的最小工作载荷通常取$F_{min}=(0.1\sim0.5)F_{max}$，而最大载荷$F_{max}\leq0.8F_{lim}$。圆柱形螺旋弹簧的结构尺寸见表 1.1.2-107。

表 1.1.2-107　**圆柱形压缩及拉伸螺旋弹簧的结构尺寸（mm）计算公式**

参数名称及代号	计算公式		说明
	压缩弹簧	拉伸弹簧	
中径D_2	$D_2=Cd$		
内径D_1	$D_1=D_2-d$		
外径D	$D=D_2+d$		
弹簧指数C	$C=D_2/d$		
压缩弹簧高径比b	$b=H_o/D_2$		b在 1～5.3 范围内选取
自由高度或长度H_0	$H_0\approx p\cdot n+(1.5\sim2)d$ $H_0\approx p\cdot n+(3\sim3.5)d$	$H_0=nd+$钩环轴向长度	两端磨平 两端不磨平
工作高度或长度 H_1，H_2，……，H_n	$H_n=H_0-\lambda_n$	$H_n=H_0+\lambda_n$	λ_n—变形量
有效圈数n			$n\geq2$
总圈数n_1	$n_1=n+(2\sim2.5)$（冷卷） $n_1=n+(1.5\sim2)$（YⅠ型热卷）		n_1尾数为 1/4，1/2，3/4，整圈。推荐用 1／2 圈

续上表

参数名称及代号	计算公式		说明
	压缩弹簧	拉伸弹簧	
节距p	$p=\frac{H_0-(1.5\sim2)d}{n}$ $p=\frac{H_0-(3\sim3.5)d}{n}$	$p=d$	两端磨平 两端不磨平
轴向间隙δ	$\delta=p-d$		
展开长度L	$L=\frac{\pi D_2 n_1}{\cos\alpha}$	$L\approx\pi D_2 n$+钩环展开长度	
螺旋导角α	$\alpha=\mathrm{arctg}\frac{p}{\pi D_2}$		对压缩螺旋弹簧推荐$\alpha=5°\sim9°$
质量m_s	$m_s=\frac{\pi d^2}{4}L\cdot\gamma$		γ为材料密度，对各种钢，$\gamma=7700\ \mathrm{kg/m^3}$；对铍青铜，$\gamma=8100\ \mathrm{kg/m^3}$

11.4.2 设计步骤

已知条件：1）F_{max} 2）λ_{max} 3）工作条件和对结构的要求。

（1）根据工作情况及具体条件，按表1.1.2-106选定材料，并查出许用扭应力$[\tau]_T$。

（2）选择弹簧指数C，要求$4\leq C\leq16$，通常取$C=5\sim8$，或按表1.1.2-105作初步选取。

（3）根据结构的安装空间初步确定弹簧中径D_2，然后算出弹簧丝直径$d=D_2/C$。

（4）强度验算

$$扭应力\ \tau_T=K\frac{8F_{max}C}{\pi d^2}\leq[\tau]_T \tag{1.1.2-32}$$

式中：K——补偿系数，对于圆剖面弹簧丝

$$K\approx\frac{4C-1}{4C-4}+\frac{0.165}{C};$$

$[\tau]_T$——许用扭应力，MPa，可查表1.1.2-106。

若不满足以上条件，应重新选择C，使d增大。

（5）根据变形条件求出弹簧工作圈数n

$$n=\frac{GD_2(\lambda_{max}+\lambda_0)}{8F_{max}C^4} \tag{1.1.2-33}$$

式中：G——弹簧材料剪切弹性模量，见表1.1.2-106；

λ_0——拉伸弹簧的初变形量，对不需淬火弹簧钢丝制成的拉伸弹簧，$\lambda_0=(0.25\sim0.43)\lambda_{max}$；压缩弹簧及没有初变形的拉伸弹簧$\lambda_0=0$。

（6）求出弹簧尺寸D、D_1、H_0，并检查其是否符合安装要求。如不符合，应改选D_2或C等参数重新计算。

（7）验算稳定性（对压缩弹簧才进行验算）

当两端固定时，高径比$b=H_0D_2$应小于5.3；当一端固定，另一端自由转动时，b应小于3.7；当两端自由转动时，b应小于2.6。

（8）按表1.1.2-107计算全部有关尺寸。

（9）绘制弹簧工作图，并画出弹簧特性曲线图。

若载荷在$F_1\sim F_2$之间变化，而且变载荷的作用次数$N>10^3$时，除以上计算外，还必须进行以下验算：

（1）疲劳强度验算

$$\text{疲劳强度的安全系数} S' = \frac{\tau_O + 0.75\tau_{min}}{\tau_{max}} \geqq S_F \tag{1.1.2-34}$$

式中：τ_O——弹簧材料的脉动循环疲劳极限，其值可查表 1.1.2-108；

τ_{min}、τ_{max}——弹簧材料内部所产生的最小和最大剪应力，$\tau_{min}=K\frac{8C}{\pi d^2}F_1$，$\tau_{max}=K\frac{8C}{\pi d^2}F_2$；

S_F——弹簧强度的设计安全系数，当弹簧的设计计算和材料的机械性能数据精确性高时，取$S_F=1.3\sim1.7$；当精确性低时，取$S_F=1.8\sim2.2$。

表 1.1.2-108　**弹簧材料的脉动循环剪切疲劳极限**

变载荷作用次数N	10^4	10^5	10^6	10^7
τ_0	$0.45\sigma_B$	$0.35\sigma_B$	$0.33\sigma_B$	$0.3\sigma_B$

（2）静强度验算

$$\text{静强度安全系数} S = \frac{\tau_S}{\tau_{max}} \geqq S_F \tag{1.1.2-35}$$

式中：τ_S——弹簧材料的剪切屈服极限。

（3）振动验算

$$\text{弹簧工作频率} f_W \leqq \frac{f_b}{15\sim20} \quad \text{Hz} \tag{1.1.2-36}$$

式中：f_b——弹簧的基本自振频率

$$f_b \approx \frac{d}{8.9D_2^2 n_1}\sqrt{\frac{G\cos\alpha}{\gamma}} \quad \text{Hz}$$

式中各符号同前。

12　刚性回转件的平衡

机器在运转时，除了作等速移动的构件以及作等角速回转且惯性主轴通过其质心外。其它构件都将产生惯性力。随着机器动作的循环。这不平衡的惯性力的大小和方向也产生周期性的变化。将会加速机器中运动副的磨损以及使机器产生有害的振动。这种振动会引起机器的精度和可靠性下降。特别对高速、精密的机器就显得更为突出。因此尽量使惯性力获得平衡，消除或减轻有害的机械振动，这就是机械平衡的目的。

12.1　刚性回转件的平衡计算

对于绕固定轴回转的构件且回转件的转速较低时(一般机械大量存在)，可以看作刚性回转件，它的平衡计算方法可见表 1.1.2-109。如果回转件的转速接近或超过回转系统的第一固有频率时。回转件会产生明显的变形。由于增加了因变形而产生新的不平衡，使问题增加新的因素。对这类回转件的平衡，称为挠性回转件的平衡。

对于刚性回转件的平衡计算，可分两种不同情况

1)质量分布在同一回转面内

表 1.1.2-109

刚性回转件的平衡计算

名称	简图说明	平衡的力学条件	重径积向量图	适用零件
不平衡质量分布在同一回转面内	各不平衡重量G_1、G_2、G_3（N），分布位置分别为：r_1、r_2、r_3（cm）。θ_1、θ_2、θ_3（°）求回转件平衡时应加重径积$G_b r_b$及方位θ_b	$\Sigma \bar{p}=0$ $\frac{G_1}{g}\bar{r}_1 w^2+\frac{G_2}{g}\bar{r}_2 w^2+\frac{G_3}{g}\bar{r}_3 w^2+\frac{G_b}{g}\bar{r}_b w^2=0$ 即： $G_1\bar{r}_1+G_2\bar{r}_2+G_3\bar{r}_3+G_b\bar{r}_b=0$	$G_1 r_1 /\!/ p_1$ $G_2 r_2 /\!/ p_2$ $G_3 r_3 /\!/ p_3$ $G_b r_b /\!/ P_b$ a) 求出$G_b r_b$后，可根据回转件的结构特点选定r_b，平衡重G_b也随之而定	转子外径D与轴向宽度b的比值$D/b\geq 5$的零件如飞轮，砂轮、叶轮，盘状凸轮
	不平衡重量G铅直向下及回转半径r。结构上允许在Ⅰ、Ⅱ平面内加减重量。求：平衡时，Ⅰ平面应加的重径积$G_{bI}r_{bI}$及Ⅱ平面应加的重径积$G_{bII}r_{bII}$。	$\Sigma \bar{p}=0$ $\Sigma \bar{M}=0$ $\begin{cases} G_{bI}r_{bI}+Gr=G_{bII}r_{bII} \\ G_{bI}r_{bI}L_1=Gr\ (L_2-L_1) \end{cases}$ 解出：$G_{bI}r_{bI}$垂直向下 $G_{bII}r_{bII}$垂直向上		转子上不允许加减重量的零件

续上表

名称	简图说明	平衡的力学条件	重径积向量图	适用零件

不平衡质量分布不在同一回转面内	不平衡重量G_1、G_2、G_3分别在1、2、3、平面内，r_1、r_2、r_3分别为其回转半径。可任选I、II平面进行平衡，求平衡时I平面上应加的重径积$G_{b1}r_{b1}$及方位θ_1。II平面上应加的重径积$G_{bII}r_{bII}$及方程θ_{II}	不平衡惯性力P_1、P_2、P_3向I、II两平面分解后得在I平面内得P_{1I}、P_{2I}、P_{3I}在II平面内得P_{1II}、P_{2II}、P_{3II}分别对I、II平面进行平衡
		I平面内$\sum \bar{p}_I=0$即：
		$G_{1I}\bar{r}_1+G_{2I}\bar{r}_2+G_{3I}\bar{r}_3+G_{bI}\bar{r}_{bI}=0$
		$G_{1I}=\frac{L_1''}{L}G_1$
		$G_{2I}=\frac{L_2''}{L}G_2$
		$G_{3I}=\frac{L_3''}{L}G_3$
		II平面内$\sum P_{II}=0$即：
		$G_{1II}\bar{r}_1+G_{2II}\bar{r}_2+G_{3II}\bar{r}_5+G_{bII}\bar{r}_{bII}=0$
		$G_{1II}=\frac{L_1'}{L}G_1$
		$G_{2II}=\frac{L_2'}{L}G_2$
		$G_{3II}=\frac{L_3'}{L}G_3$
			I平面
			$G_{1I}r_1 // P_{1I}$
			$G_{2I}r_2 // P_{2I}$
			$G_{3I}r_3 // P_{3I}$
			$G_{bI}r_{bI} // P_{bI}$
			b)
			II平面
			$G_{1II}r_1 // P_{1II}$
			$G_{2II}r_2 // P_{2II}$
			$G_{3II}r_3 // P_{3II}$
			$G_{bII}r_{bII} // P_{bII}$
			c)
				回转件的外径D与轴向宽度b的比值$D/b<5$的零件如多缸发动机的曲轴。电动机的转子汽轮机的转子及机床主轴等

对于轴向宽度较小的回转件，其质量分布近似地认为在同一回转面内。当该回转件等速回转时，这些质量所产生的离心惯性力构成汇交于回转中心的平面汇交力系。如要平衡，应在同一回转面内加一平衡质量(或相反位置减一质量)。使平衡质量所产生的离心力与原有质量所产生的离心力的向量和等于零，该力系就成为一平衡力系，回转件即达到平衡状态。这类平衡称为静平衡。

2)质量分布不在同一回转平面内（见表 1.1.2-109）

对于轴向宽度较大的回转件、其质量分布不能近似地认为是位于同一回转面内,当回转件转动时所产生的离心力,不再是一个平面汇交力系,而是空间力系。要达到完全平衡,可任意选定两个平行平面 I 和 II,将各不平衡重量所产生的惯性力P_1、P_2、P_3向 I 、II 两个平面分解,得P_{1I}、P_{2I}、P_{3I}(在平面 I 内)及P_{1II}、P_{2II}、P_{3II}(在平面 II 内)。这样就把空间力系的平衡问题,转化成两个平面上的汇交力系的平衡问题,只要在 I 、II 平面内适当地各加一个平衡重量,使两个平面内的惯性力的向量和均等于零,这个回转件也就完全平衡了。这类平衡称为动平衡。

12.2 回转件的平衡精度

对于已经经过平衡计算的回转件，并具也设置了平衡配重，理论上是完全平衡的，但是由于计算、制造和装配上的误差。以及回转件的材料质量不均、毛坯缺陷等原因，往往仍达不到预期的平衡，只能借助于平衡试验设备，用实验的方法来确定不平衡重量的大小及方位，然后再以加重或减重的办法予以消除。

表 1.1.2-110　静平衡与动平衡的选择依据

平衡方法	回转件外径D与其长度之比值	工作转速
静平衡	$D/L \geq 5$	任何转速
动平衡	$D/L \leq 1$	$n>1000$ r/min

平衡试验可分为静平衡和动平衡两种（表 1.1.2-110)。表中未包括回转件与支承基础的重量比、转子形状、转速、工作条件，使用时，应视具体条件而定。

回转件经平衡试验后，可将不平衡的惯性力及其引起的动力效果减少到相当低的程度。回转件平衡的优良程度，称为回转件的平衡精度。目前，我国尚未定出平衡精度的标准，一般都是根据回转件的许多偏心距［e］与回转件角速度的乘积［e］ω来表达平衡精度的，并把［e］ω乘积的大小来分级的，表 1.1.2-111 表示各种典型刚性回转件的平衡精度。图 1.1.2-66 为各种精度等级下，工件的最高转速与许用偏心距的关系，应用图 1.1.2-66 时，应注意下列情况：

表 1.1.2-111　各种典型刚性回转件的平衡精度等级

精度等级 G	平衡精度 ① $\frac{[e]\ \omega}{1000}$ mm/s	典型刚性回转件示例
G4000	4000	刚性安装的具有奇数汽缸的低速② 船用柴油机曲轴传动装置③
G1600	1600	刚性安装的大型二冲程发动机曲轴传动装置
G630	630	刚性安装的大型四冲程发动机曲轴传动装置，弹性安装的船用柴油机曲轴传动装置
G250	250	刚性安装的高速四缸柴油机传动装置
G100	100	六缸和六缸以上高速② 柴油机曲轴传动装置；汽车、机车用发动机整体(汽油机或柴油机)
G40	40	汽车轮、轮缘、轮组、传动轴、弹性安装的六缸或六缸以上的高速四冲程发动机(汽油机或柴油机）曲轴传动装置；汽车、机车用发动机曲轴传动装置

精度等级 G	平衡精度 ① $\frac{[e]\omega}{1000}$ mm/s	典型刚性回转件示例
G16	16	特殊要求的传动轴(螺旋桨轴、万向联轴器轴)；破碎机械的零件；农业机械零件；汽车和机车发动机（汽油机或柴油机）部件；特殊要求的六缸或六缸以上的发动机曲轴传动装置
G6.3	6.3	作业机械零件；船用主汽轮机齿轮（商船用）；离心机鼓轮；风扇；航空燃气轮机转子部件；泵的叶轮；机床及一般机械的回转零、部件；普通电机转子；特殊要求的发动机部件
G2.5	2.5	燃气轮机和汽轮机的转子部件；刚性汽轮发电机转子；透平压缩机转子；机床主轴和驱动部件；特殊要求的大型和中型电机转子；小型电机转子；透平驱动泵
G 1.0	1.0	磁带记录仪及录音机驱动部件；磨床驱动部件；特殊要求的微型电机转子
G0.4	0.4	精密磨床主轴，砂轮盘及电机转子；陀螺仪

① ω为回转件转动的角速度（S^{-1}）；[e] 为许用偏心距（μm）；

② 按国际标准。低速柴油机的活速度小于 9 m/s，高速柴油机的活塞速度大于 9 m/s；

③ 曲轴传动装置是包括曲轴、飞轮、离合器、带轮、减振器、连杆回转部分等的组合件。

1)对于静不平衡的回转件，由图中查得的许用偏心距［e］与该回转件重量G的乘积，即为该回转件的许用重径积G［e］。

2)对于动不平衡的回转件，由图中查得的许用偏心距［e］与该回转件重量G的乘积$G\cdot$［e］算出后，再将它分配到两个平衡基面上去，举例如下

例：图 1.1.2-67 为一回转零件，其工作转速n=3000 r/min，重量G=800 N，点C为其重心，它至两基面 I 、II的距离分别为L_1=40 cm，L_2=60 cm，要求该回转的平衡精度为G6.3级、试确定两平衡基面 I 、II内的许用不平衡重径积。

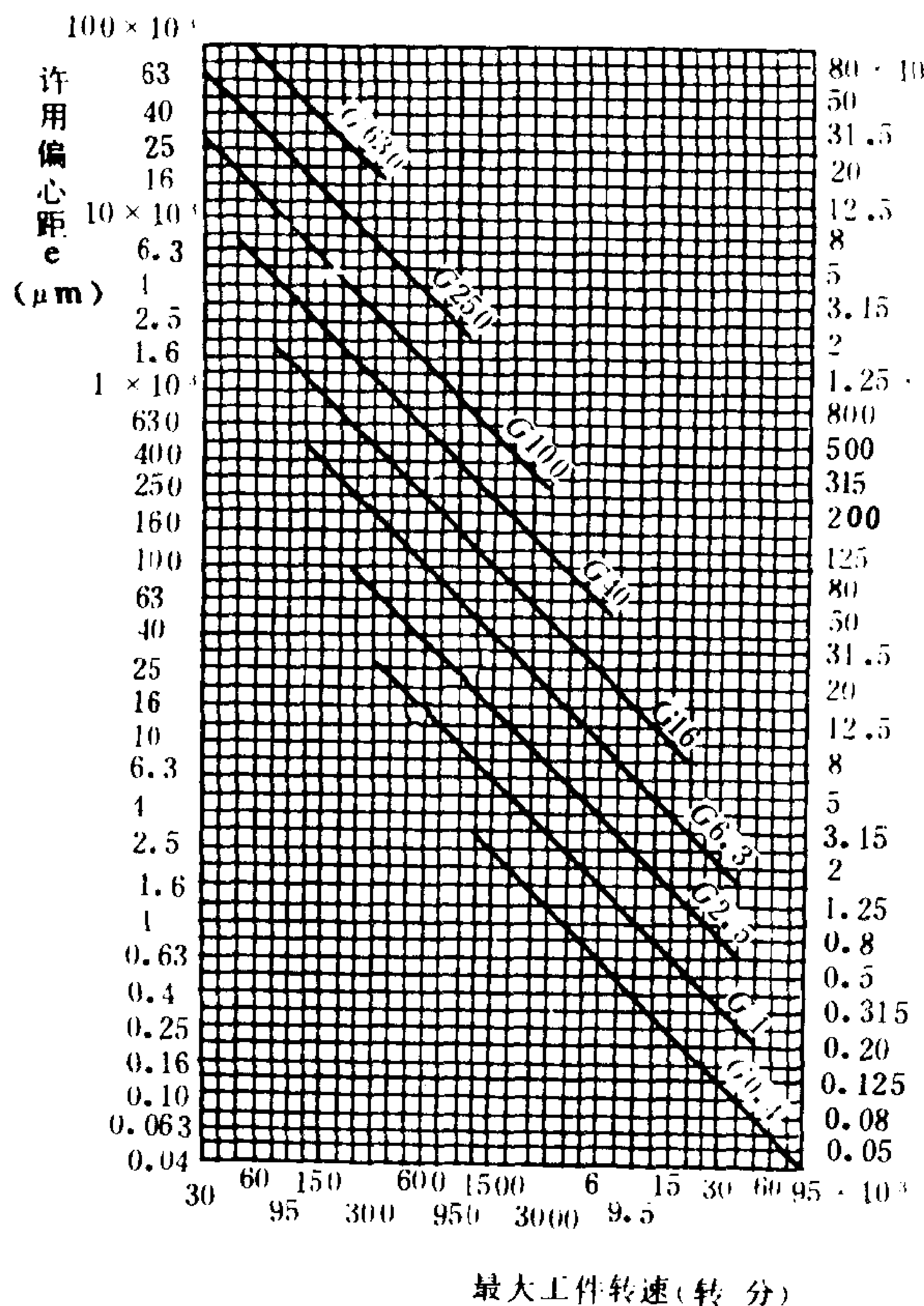


图 1.1.2-66 对应于各种平衡等级G的许用偏心距

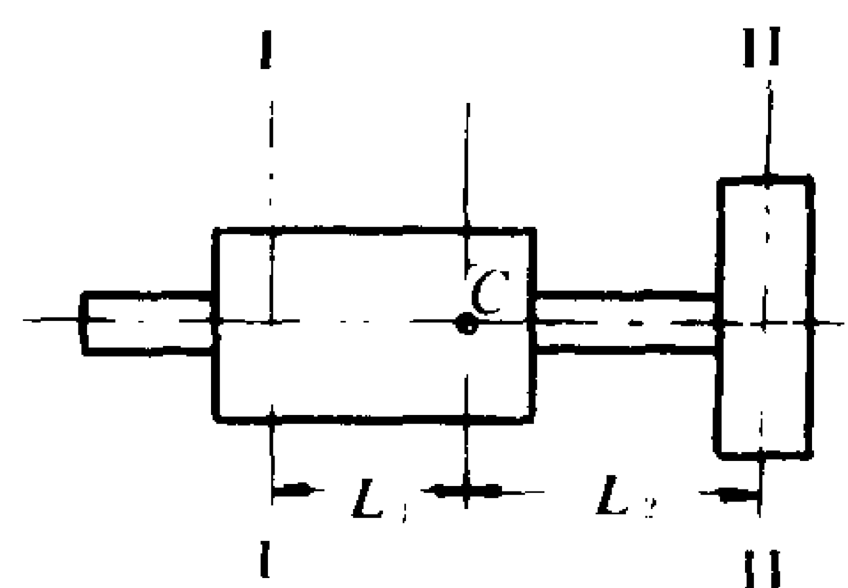


图 1.1.2-67 回转零件

解：由图 1.1.2-66 按 n=3000 r/min垂直向上，与G6.3级线相交点，过该点作水平线与纵坐标相截得许用偏心距［e］=21 μm，可求得许用不平衡的重径积的上限为

$$G\ [e]=800\times21=16800\ \mathrm{N}\cdot\mu\mathrm{m}$$

平衡基面 I 及II内的许用不平衡重径积分别为

$$[G_{\mathrm{I}} r_{\mathrm{I}}] = \frac{L_2}{L_1 + L_2} G \; [e] = \frac{60}{100} \times 16800 \times 10^{-3} = 10.08 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$[G_{\mathrm{II}} r_{\mathrm{II}}] = \frac{L_1}{L_1 + L_2} G \; [e] = \frac{40}{100} \times 16800 \times 10^{-3} = 6.72 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

参考文献

〔1〕机械工程手册，机械工业出版社，1982 年 9 月

〔2〕机械零件设计手册；冶金工业出版社，1982 年 1 月

〔3〕机械零件设计手册；国防工业出版社，1986 年 12 月

〔4〕钢质海船入级与建造规范，中华人民共和国船舶检验局，1986 年

〔5〕机械技术手册，日本机械学会编，1975 年 9 月

〔6〕黄锡恺：机械原理，高等教育出版社，1982 年修订版

〔7〕孙桓：机械原理，人民教育出版社，1982 年修订版

〔8〕许镇宇、邱宣怀主编：机械零件，人民教育出版社，1981 年修订版

〔9〕濮良贵主编：机械零件、高等教育出版社，1982 年修订版

〔10〕杨可桢、程光蕴主编：机械设计基础，人民教育出版社，1981 年修订版

第3章 流体力学

流体力学是研究流体平衡和运动规律以及流体与固体之间作用力等问题的科学。流体力学广泛应用于各种工程领域，它与轮机工程有密切的关系，是重要的理论基础之一。本章介绍有关流体力学基础知识，并提供相应的计算公式和数据。

1 流体的性质

流体是液体和气体的统称。流体在切向力作用下，将产生连续变形。本章研究的流体是具有连续性的物质。

1.1 流体的密度

单位体积流体的质量称为流体的密度。均质流体的密度为：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \tag{1.1.3-1}$$

式中：m——均质流体的质量，kg；

V——均质流体的体积，m^3。

单位体积流体的重量（重力）称为流体的重度。均质流体的重度为：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{N/m}^3 \tag{1.1.3-2}$$

式中：G——均质流体的重力，N。

重度与密度的关系为：

$$\gamma = \rho g \tag{1.1.3-3}$$

式中：g——当地重力加速度，m/s^2。

1.1.1 液体的密度

液体的密度随温度和压力的变化较小。在压力不大（如1 MPa）时，液体的密度可以认为与压力无关。

压力为一个标准气压（0.1013 MPa），温度为20°C时，几种液体的密度见表1.1.3-1。

压力为一个标准气压（0.1013 Mpa），温度不同时，水的密度见表1.1.3-2。

表1.1.3-1 压力为一个标准气压（0.1013 MPa），温度为20°C时各种液体的密度

液体	密度 kg/m³	液体	密度 kg/m³
水	997.6	石油（15°C）	880~890
海水	1020	煤油	810~840
水银 Hg	13537	轻柴油	830~860
酒精 CH_3CH_2OH	791	柴油	910
四氯化碳	1593	重油	900~950
普通汽油	680~790	矿物类润滑油（15°C）	890~920

表 1.1.3-2　　压力为一个标准气压，不同温度下水和空气的密度

温度 ℃	密度 kg/m³		温度 ℃	密度 kg/m³	
	水	空气		水	空气
−20		1.39	50	987.4	1.10
−10		1.34	55	985.1	
0		1.29	60	982.6	1.06
5	999.3		65	979.9	
10	999.1	1.25	70	977.1	1.03
15	998.5		75	974.2	
20	997.6	1.20	80	971.2	0.999
25	996.4		85	968	
30	995	1.17	90	964.7	0.97
35	993.4		95	961.3	
40	991.6	1.13	100	957.7	0.95
45	989.6				

压力不变时，液体在不同温度下密度值可按下式计算

$$\rho_t=\frac{\rho_{t1}}{1+\beta_T(t-t_1)} \quad \mathrm{kg/m^3} \qquad (1.1.3\text{-}4)$$

式中：β_T——液体的体积膨胀系数（详见表 1.1.3-5）；

ρ_{t1}——液体为 t_1℃的密度，kg/m³。

1.1.2　气体的密度

气体的密度随压力和温度的变化较大。当压力为 760 mmHg，温度不同时，空气的密度见表 1.1.3-2。

当压力为一个标准气压，温度为 0 ℃时，各种气体的密度见表 1.1.3-3。

表 1.1.3-3　　各种气体的密度　（压力为一个标准气压，温度为 0 ℃）

气体	密度 kg/m³	气体	密度 kg/m³
空气	1.292	二氧化碳 CO_2	1.975
氧 O_2	1.43	氨 NH_3	0.77
氮 N_2	1.25	烟气	1.30~1.34
氢 H_2	0.0898	水蒸汽	0.804
氯 Cl_2	3.21		

当压力不变时，气体的密度随温度变化关系，可按下式近似计算

$$\rho_t=\frac{\rho_0}{1+0.00367t} \quad \mathrm{kg/m^3} \qquad (1.1.3\text{-}5)$$

式中：ρ_0——在温度为 0 ℃时的气体密度，kg/m³；

ρ_t——在温度为t℃时气体密度，kg/m³。

当温度不变时。气体在不同压力下的密度可按下式计算

$$\rho_t=\frac{\rho_{P_0}B}{760} \quad \mathrm{kg/m^3} \qquad (1.1.3\text{-}6)$$

式中：ρ_{P_0}——压力为一个标准气压时的气体密度；

B——气体压力，mmHg。

如果压力，温度都不变化，则可按下式计算气体密度的变化

$$\rho=\rho_0(\frac{p}{p_0})(\frac{T_0}{T}) \quad \text{kg/m}^3 \qquad ((1.1.3\text{-}7)$$

式中：p_0——标准大气压力（0.1013 MPa）；

ρ_0——在压力为一个标准气压，温度$T_0=273K$的气体的密度，kg/m^3。

混合气体的密度可按各组分气体所占容积百分比计算。

$$\rho=\rho_1\alpha_1+\rho_2\alpha_2+\cdots\cdots+\rho_n\alpha_n=\sum_{i=1}^{n}\rho_i\alpha_i \qquad (1.1.3\text{-}8)$$

式中：ρ_1、$\rho_2\cdots\cdots\rho_n$——混合气体中各组分气体的密度，kg/m^3；

α_1、$\alpha_2\cdots\cdots\alpha_n$——混合气体中各组分气体的容积百分数。

1.2 流体的压缩性和膨胀性

1.2.1 压缩性、体积压缩系数

在一定的温度下，流体体积随压力增加而缩小的性质，称为流体的压缩性。

体积压缩系数β_p是指温度不变时，每增加一个单位压力所引起的体积相对变化量，即

$$\beta_p=\frac{-dV}{V\alpha p} \quad m^2/N \qquad (1.1.3\text{-}9\ a)$$

式中：V——流体在压力p和温度t时的体积，m^3；

dV——流体体积的变化量，m^3；

dp——流体压力的增量，N/m^2。

因为dp为正值时，dV总是负值，反之亦然，在计算中取β_p为正值，故引入一个负号。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性模量E，即

$$E=\frac{1}{\beta_p}=-\frac{Vdp}{dV} \quad N/m^2\ (Pa) \qquad (1.1.3\text{-}9\ b)$$

流体的E随压力和温度的变化见表 1.1.3-4。

表 1.1.3-4　水的体积弹性模量E　(10^9Pa)

温度℃ \ 压力(10^5Pa)	4.9	9.8	19.6	39.2	78.5
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

气体的压缩性与液体不同，它是随气体的热力学过程而定，一般情况下，需要同时考虑压力和温度对于气体的密度的影响。对于完全气体，可用状态方程表示，即

$$p=\rho RT \qquad (1.1.3\text{-}10)$$

式中：p——气体的绝对压力，N/m^2；

ρ——气体的密度，kg/m^3；

T——气体的绝对温度，K；

R——气体常数，N · m/（kg · K）。

1.2.2 膨胀性、体积膨胀系数

在一定的压力下，流体的体积随温度升高而增大的性质，称为流体的膨胀性。体积膨胀系数β_T是指压力不变时，温度升高 1 K时所引起的体积相对增大量，即

$$\beta_T=\frac{\frac{dV}{V}}{dT} \quad 1/K \tag{1.1.3-11}$$

式中：dT——流体绝对温度增加量，K。

水的β_T值随温度和压力的变化见表 1.1.3-5。

表 1.1.3-5　**水的体积膨胀系数$\beta_T\times10^6$（1/K）**

压力$p\times10^5N/m^2$	温　度　K				
	273～283	283～293	313～323	333～343	363～373
0.981	14	150	422	556	719
98.1	43	165	422	548	704
196.2	72	183	426	539	
490.5	149	236	429	523	661
882.9	229	289	437	514	621

1.2.3　可压缩流体和不可压缩流体

1)可压缩流体　密度随压力变化的流体称为可压缩流体。可压缩流体又可分为正压流体和斜压流体。密度仅是压力的函数称为正压流体；当密度为压力和温度两个变量的函数称为斜压流体。

2)不可压缩流体　密度不随压力变化而变化的流体，称为不可压缩流体。

实际上，流体都是可以压缩的。由于液体的体积压缩系数很小，通常把它作为不可压缩流体来处理，但是，对于压力变化很大的情况，如水击现象，水中爆炸等，则仍须考虑其压缩性。气体的压缩性大，通常把它作为可压缩流体，但是，对于低速气流，当速度小于 100 m/s时，气体的压力和温度在这个流动过程中变化很小，从而引起的密度变化很小，可以近似地作为不可压缩流体。

1.3　流体的粘性

流体流动时，其内部出现内摩擦力的性质称为流体的粘性。流体粘性的大小，用粘度来度量。同一种流体的粘度随流体的温度和压力而变化。

1.3.1　牛顿内摩擦定律

牛顿内摩擦定律是指沿直线运动着的两层流体之间的内摩擦应力(切应力)，它的大小与流体的性质有关与流体层接触面法线方向的速度梯度成正比，即

$$\tau=\mu\frac{dv}{dn} \quad N/m^2 \tag{1.1.3-12}$$

式中：$\frac{dv}{dn}$——沿接触面法线方向的速度梯度，1/s；

μ——表示流体的物理性质的比例系数称为动力粘度（动力粘性系数），Pa · s。

当$\frac{dv}{dn}=0$，即两层流体相对静止时，$\tau=0$，不存在内摩擦力。

1.3.2　粘度

1)粘度的单位和表示方法

（1）动力粘度　根据牛顿内摩擦定律（1.1.3-12），当流体层接触面法线方向的速度梯度$dv/dn=1$时的流体内摩擦应力$\tau=\mu$，称为流体的动力粘度，即：

$$\mu=\frac{\tau}{dv/dn} \quad \text{Pa·s (N·s/m}^2\text{)} \qquad (1.1.3\text{-}13)$$

动力粘度的单位有国际单位制（Pa·s），绝对单位制（dyn·s/cm²）以及工程单位制（kgf·s/m²）。它们的关系见表1.1.3-6。

表1.1.3-6　　动力粘度单位的换算表

帕斯卡·秒 Pa·s $\frac{牛顿·秒}{米^2}$ N·S/m²	泊 P $\frac{达因·秒}{厘米^2}$ $\frac{dyn·s}{cm^2}$	厘泊 CP	$\frac{kgf·s}{m^2}$
1	10	100	0.102

（2）运动粘度　动力粘度与其同温度、同压力下的密度ρ之比，即

$$\nu=\frac{\mu}{\rho} \quad \text{m}^2/\text{s} \qquad (1.1.3\text{-}14)$$

运动粘度的单位有时常用沲（St）或厘沲（cSt），

$$1\ \text{St}=1\ \text{cm}^2/\text{s}=100\ \text{mm}^2/\text{s}=100\ \text{cSt}$$

（3）恩氏粘度（恩格勒粘度）°E　在测定温度下，200 cm³的液体流出恩格勒粘度计所需的时间t与200 cm³、20°C的蒸馏水流出同一仪器所需的时间t_0的比值，即

$$°E=\frac{t}{t_0} \qquad (1.1.3\text{-}15)$$

恩氏粘度与运动粘度ν的换算关系可用下列经验公式计算

$$\nu=\left(0.0731°E-\frac{0.0631}{°E}\right) \quad \text{cm}^2/\text{s} \qquad (1.1.3\text{-}16)$$

当°E>10时，.可用下式计算

$$\nu=0.0741°E \quad \text{cm}^2/\text{s} \qquad (1.1.3\text{-}17)$$

2)液体的粘度

液体的粘度随温度的升高而降低。压力对液体粘度的影响很小，当压力小于5 MPa时，可不计其影响。

水的动力粘度与温度的关系，可近似地用下式计算

$$\mu=\frac{\mu_0}{1+0.0337t+0.000221t^2} \quad \text{N·s/m}^2 \qquad (1.1.3\text{-}18)$$

式中：μ_0——水在0°C时的动力粘度，N·s/m²；

t——水的摄氏温度，°C。

水的动力粘度和运动粘度与温度的关系见表1.1.3-7。常见的几种液体在标准状态下的粘度见表1.1.3-8，几种液体和气体的粘度随温度的变化的曲线见图1.1.3-1和1.1.3-2。

表1.1.3-7　　水的粘度与温度的关系

温度 °C	动力粘度$\mu\times10^3$ N·s/m²	运动粘度$\nu\times10^6$ m²/s	温度 °C	动力粘度$\mu\times10^3$ N·s/m²	运动粘度$\nu\times10^6$ m²/s
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556

续上表

温度 ℃	动力粘度$\mu\times10^3$ N·s/m²	运动粘度$\nu\times10^6$ m²/s	温度 ℃	动力粘度$\mu\times10^3$ N·s/m²	运动粘度$\nu\times10^6$ m²/s
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 1.1.3-8　　几种液体的粘度与温度的关系

液体	温度 ℃	动力粘度$\mu\times10^3$ N·s/m²	运动粘度$\nu\times10^6$ m²/s	液体	温度 ℃	动力粘度$\mu\times10^3$ N·s/m²	运动粘度$\nu\times10^6$ m²/s
水	20	1.005	1.007	煤油	20	1.92	2.376
水银	20	1.56	0.115	透平油	20	73.99	
乙醇	20	1.199	/	润滑油	40	211.68	
原油	20	7.2	8.41	重柴油	50	≤3.62	
汽油	20	0.29	0.428				

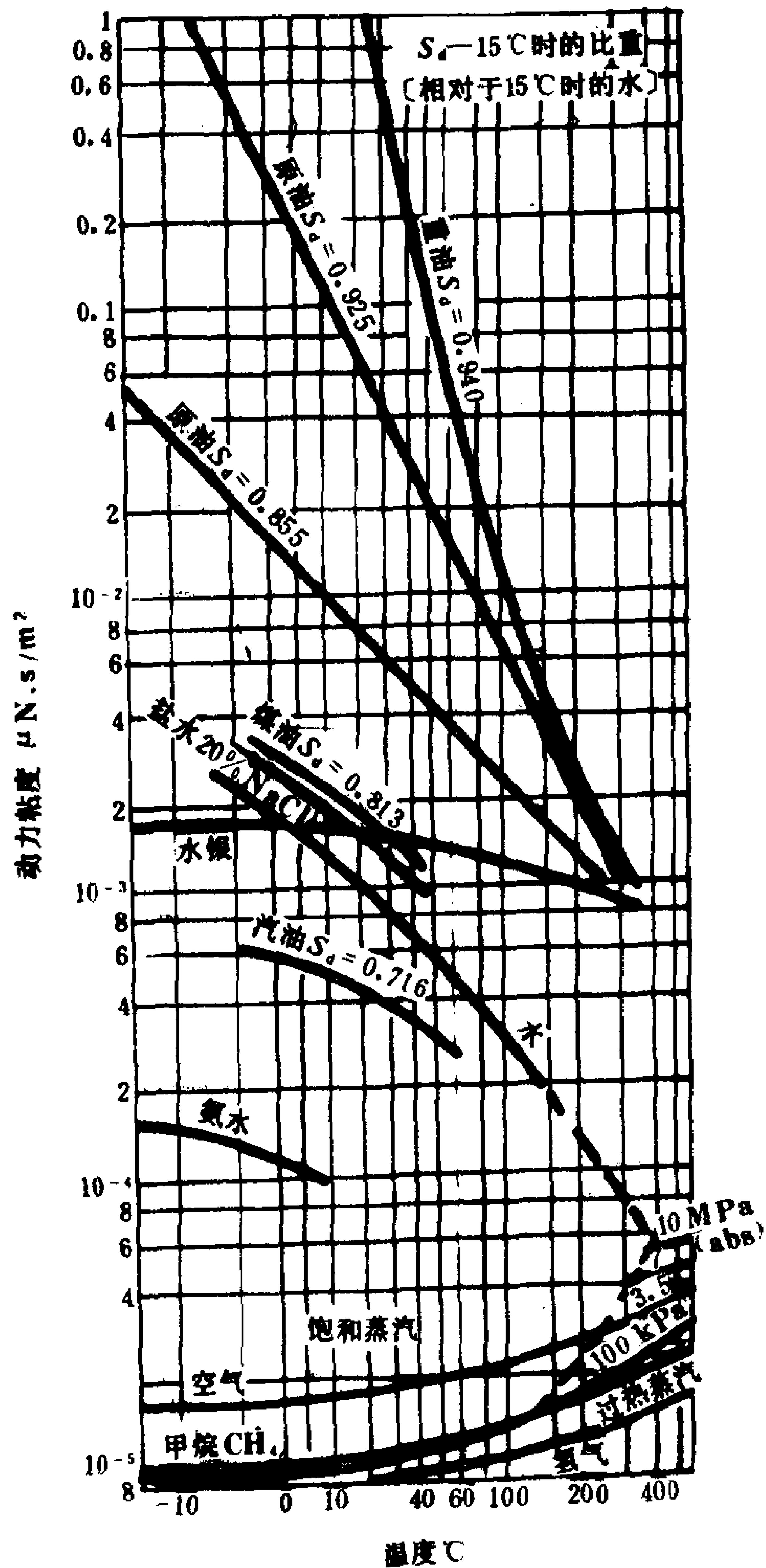


图 1.1.3-1　流体的动力粘度随温度的变化曲线

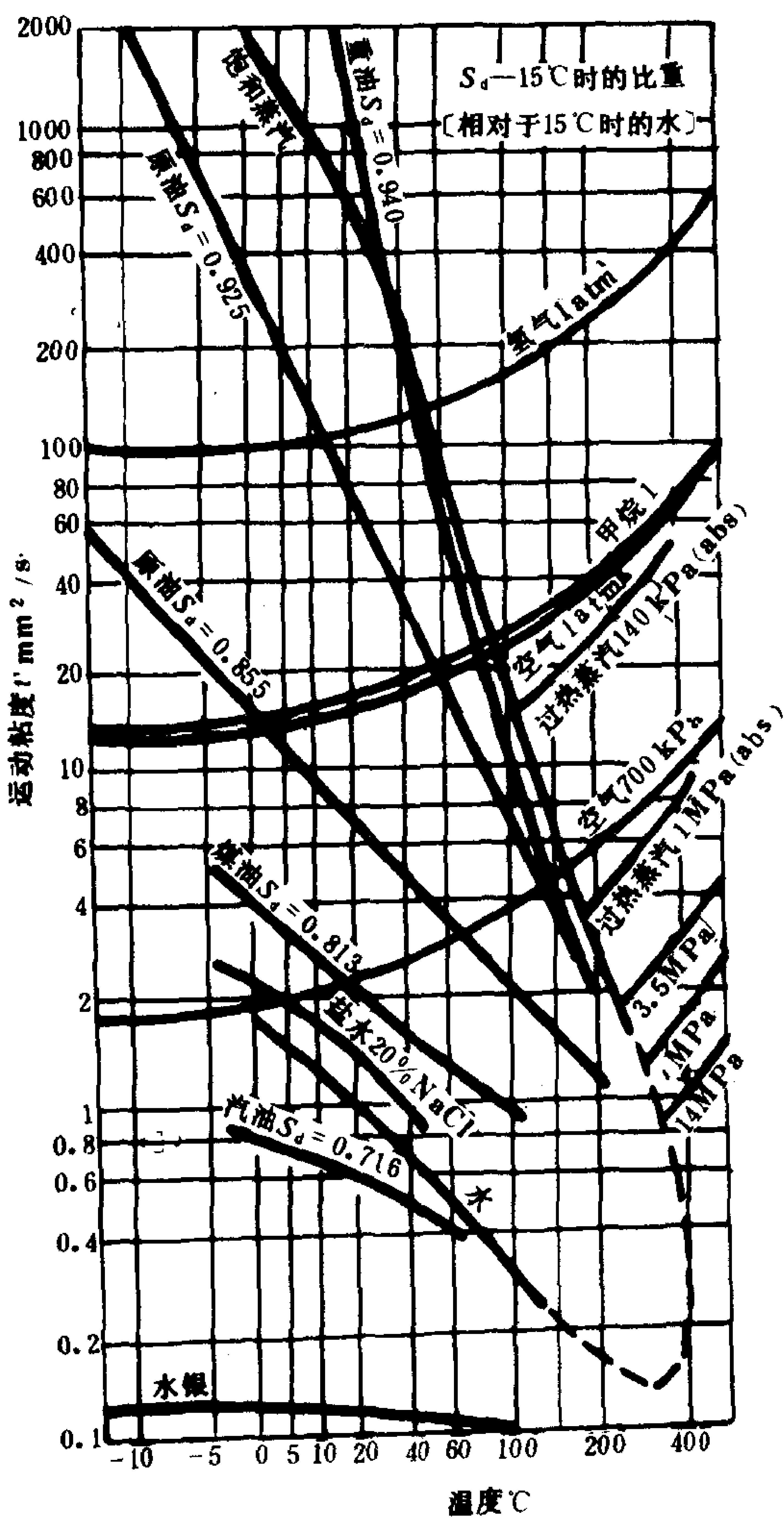


图 1.1.3-2　流体的运动粘度随温度的变化曲线

3)气体的粘度

气体的粘度随温度和压力的增大而增大。当压力小于 1 MPa时，可不考虑其影响。

压力不变时，不同温度下的气体动力粘度可按下式计算：

$$\mu_t=\mu_0\left(\frac{T}{273}\right)^n \quad N\cdot s/m^2 \tag{1.1.3-19 a}$$

式中：μ_0——压力为一个标准气压、温度为 0 ℃时，气体的动力粘度，$N\cdot s/m^2$；

T——气体的绝对温度，K；

n——温度指数。空气$n\approx0.76$，氢$n\approx0.69$，二氧化碳$n\approx0.95$。在估算时，高温一般可取$n\approx0.5$，低温$n\approx1$。

在压力为一个标准气压下，空气的粘度随温度的变化见表 1.1.3-9。

表 1.1.3-9 **空气的粘度和温度的关系**

温度 ℃	动力粘度$\mu\times10^6$ $N\cdot s/m^2$	运动粘度$\nu\times10^6$ m^2/s	温度 ℃	动力粘度$\mu\times10^6$ $N\cdot s/m^2$	运动粘度$\nu\times10^6$ m^2/s
−40	14.9	9.8	80	20.88	20.90
−20	16.1	11.5	100	21.75	23.00
0	17.1	13.2	120	22.60	25.20
10	17.6	14.1	140	23.44	27.40
20	18.1	15.0	160	24.25	29.80
30	18.6	16.0	180	25.05	32.20
40	19.0	16.8	200	25.82	34.60
60	20.0	18.7	220	26.58	37.10

混合气体的动力粘度可用下列近似公式计算。

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad N\cdot s/m^2 \tag{1.1.3-19 b}$$

式中：α_i——混合气体中i组分气体所占的容积百分数；

M_i——混合气体中i组分气体的分子量；

μ_i——混合气体中i组分气体的动力粘度。

例：已知测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为：$\alpha_{CO_2}=13.6\%$，$\alpha_{SO_2}=0.4\%$，$\alpha_{O_2}=4.2\%$，$\alpha_{N_2}=75.6\%$，$\alpha_{H_2O}=6.2\%$，试求烟气在标准状态下的粘度(设烟气的密度$\rho=1.34$ kg/m^3)。

解：将由表 1.1.3-8 查得的各组分气体的μ_0和M值代入式(1.1.3-19)，得在标准状态下烟气的动力粘度

$$\mu=\frac{0.136\sqrt{44}\times13.8+0.004\sqrt{64}\times11.6+0.042\sqrt{32}\times19.2+0.756\sqrt{28}\times16.6+0.062\sqrt{28}\times8.93}{(0.136\sqrt{44}+0.004\sqrt{64}+0.042\sqrt{32}+0.756\sqrt{28}+0.062\sqrt{18})\times10^6}$$

$$=15.9\times10^{-6} \quad N\cdot s/m^2$$

烟气的运动粘度

$$\nu=\frac{\mu}{\rho}=\frac{15.9\times10^{-6}}{1.34}=11.9\times10^{-6} \quad m^2/s$$

1.3.3 粘性流体和理想流体

1)粘性流体 具有粘性的流体称为粘性流体(或实际流体)。粘性流体沿固体壁面流动时

相对于固体壁面的流速等于零，即流体质点附着在固体壁上。在许多实际流动中，流体粘性的影响，在固壁面邻近的一薄层流动区域内（称为边界层）表现得比较显著。

粘性流体又可分为牛顿流体与非牛顿流体。切应力τ与速度梯度$\frac{dv}{dn}$的关系满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如空气、水、油、乙醇等属于这一类；不满足牛顿内摩擦定律的流体，如粘土浆、纸浆、油漆、含有悬浮微粒杂质或纤维物的流体属于这一类。

2）理想流体　不具有粘性的流体称为理想流体。理想流体沿固壁流动时，流体与壁面的法向相对速度为零，切向速度不等于零，亦即流体质点可以沿壁面滑动。

理想流体仅仅是处理实际流动问题时的一种简化模型。许多实际问题中，粘性力不是主要作用力，按理想流体来考虑，可以足够精确地描述流动情况。例如，对于无分离的绕流，附面层外边界上的速度分布，压力分布等。但对于计算流动的能量损失，物体阻力等问题时必须计及粘性的影响。

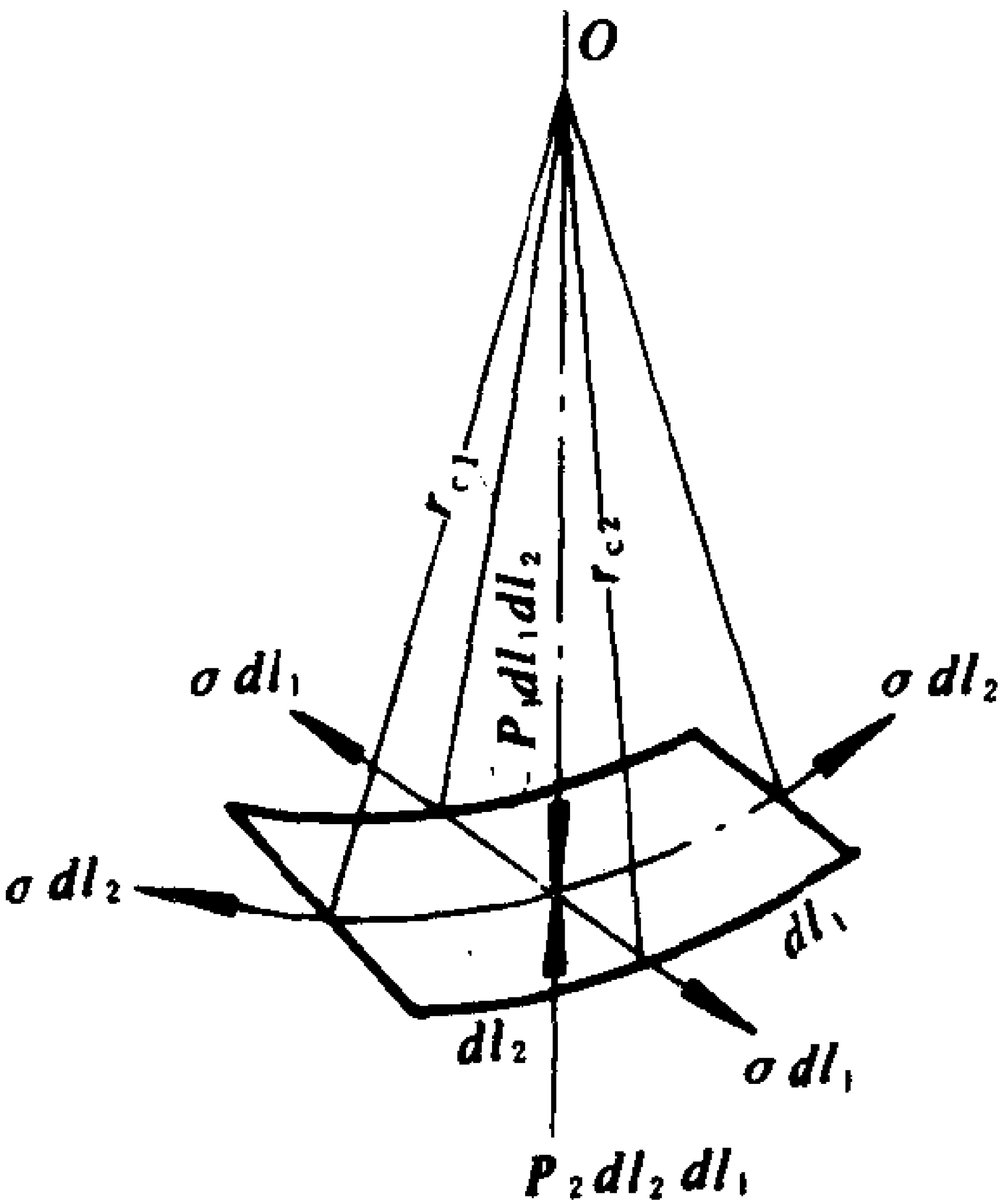


图 1.1.3-3　表面张力

1.4　表面张力和毛细现象

1.4.1　表面张力

作用在液体表面上并力图使液体表面收缩成最小面积的力，称为表面张力f，其计算公式为：

$$f=\sigma \cdot l \quad \text{N} \tag{1.1.3-20}$$

式中：l——液体接触面边界长度，m；

σ——作用在单位长度上的表面引力，称为表面张力系数，N/m。

表面张力系数σ的大小与液体的性质、温度和与其接触的介质有关。温度愈高，表面张力系数愈小。几种液体与空气接触时的表面张力系数值见表 1.1.3-10。

表面张力使液体接触面的垂直方向上产生压力差（图 1.1.3-3）。计算公式见表 1.1.3-11。

表 1.1.3-10　**几种液体的表面张力系数**

液　体	温度 ℃	表面张力系数 $\sigma\times10^3$ N/m	液　体	温度 ℃	表面张力系数 $\sigma\times10^3$ N/m
水	0	75.61	水	90	
水	10	74.19	水	100	
水	20	72.73	水银在空气中	20	459.6
水	30	71.15	水银在真空中	20	485.7
水	40	69.53	水银在水中	20	392.6
水	50	67.88	煤油	20	23.3～32.1
水	60	66.15	润滑油	20	35～37.9
水	70	64.39	泵油	20	23.3～37.9
水	80	62.58	乙醇	20	22.3

表 1.1.3-11　　液体接触面垂直方向的压力差

接触面形状	公式	说明
任意	$\Delta P=P_1-P_2$ $=\sigma(\frac{1}{r_{C_1}}-\frac{1}{r_{C_2}})$	σ——表面张力系数（N/m） r_{C_1}、r_{C_2}——液体接触面的主曲率半径。当曲率中心在液体内部时r_C取正值，反之取负值
球形	$\Delta P=\pm 2\sigma/r$	凸出的接触面取正号，反之，取负号
柱形	$\Delta P=\pm\sigma/r$	凸出的接触面取正号，反之，取负号

1.4.2 毛细现象

将毛细管（横断面很小的细管）插入液体内，管内外液面产生高度差的现象，称为毛细现象。

对于能润湿管壁的液体，管内液面呈凹面并且升高（图 1.1.3-4 a)；对于不能润湿管壁的液体，则管内液面呈凸面。并且下降（图 1.1.3-4 b)。毛细管越细，液面差h越高。

几种液体在玻璃圆断面毛细管和玻璃平行板间缝隙中，上升或下降的液面高h见表 1.1.3-12

表 1.1.3-12　　几种液体的毛细现象中的液面高差h（mm）

液体	玻璃毛细管内径为d mm	平行玻璃板缝隙距离为b mm	液体	玻璃毛细管内径为d mm	平行玻璃板缝隙距离b mm
水	$30/d$	$15/b$	甲苯	$13/d$	$6.5/b$
酒精	$10/d$	$5/b$	水银	$-10/d$	$-5/b$

2 流体力学中的一些基本概念

2.1 作用于流体上的力

2.1.1 质量力和表面力

1)质量力，作用于流体每一质点上的力，其数值与流体的质量成正比，如重力、惯性力、离心力和电磁力等。

2)表面力　作用于流体表面上的力，其数值与流体表面积的大小成正比，如流体的压力和内摩擦应力（切应力）等。

2.1.2 压力、静压、动压和总压

作用在流体单位面积上，并且垂直指向受力面的表面力，称为流体的压力。

（1）静压　流场中某点处的流体压力p，又称为该点流体的静压。

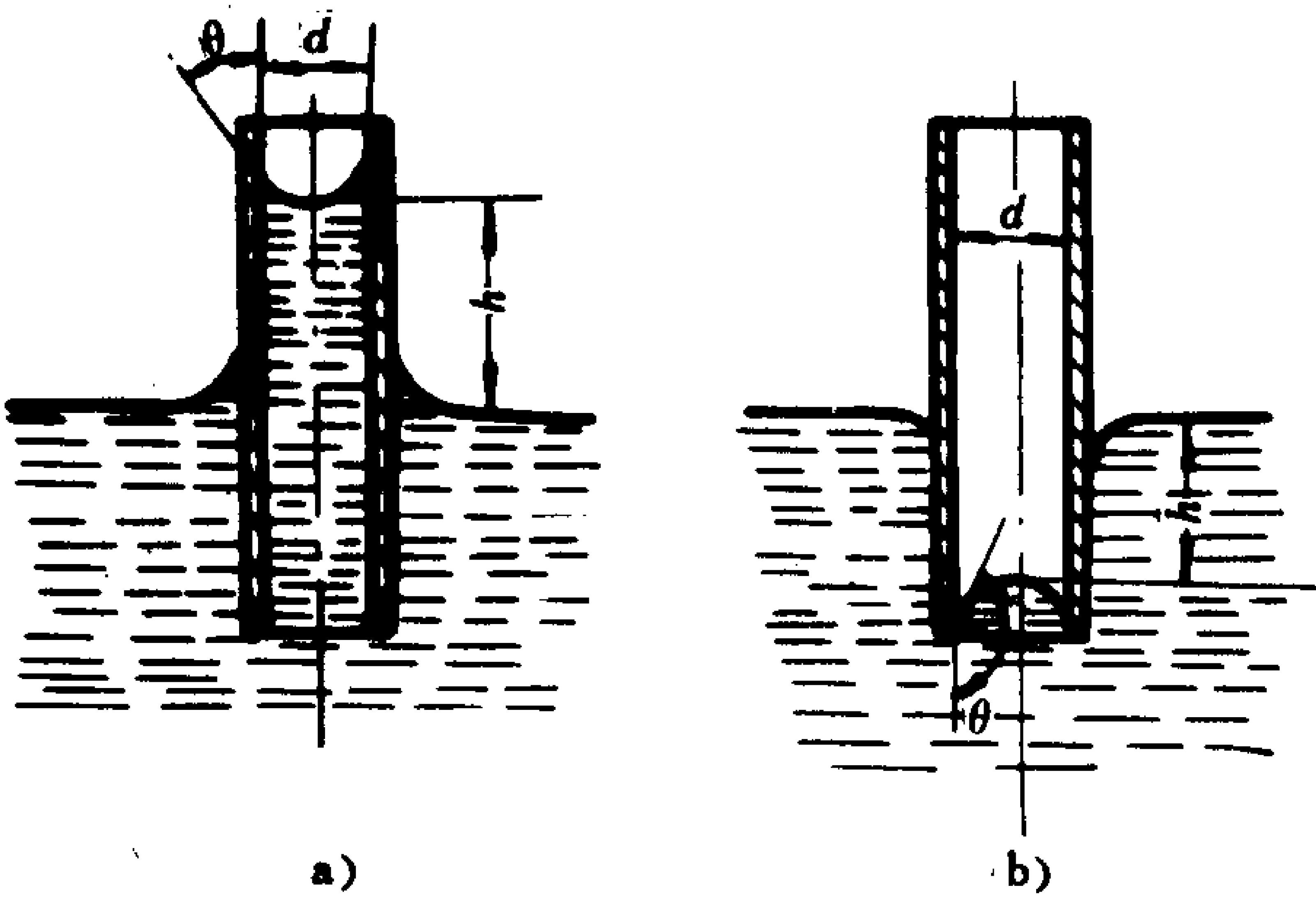


图 1.1.3-4　毛细现象

（2）动压　流场中某一点处的单位质量的流体的动能$\frac{1}{2}\rho v^2$，称为该点的动压。

（3）总压　流场中某一点处的静压与动压之和（$p+\frac{1}{2}\rho v^2$）称为该点处流体的总压。如果按一定的过程将流体的速度滞止为零，此时流体的压力称为滞止压力（驻压）或总压。

2.1.3　绝对压力、表压力和真空

1）绝对压力 p　以完全真空为基准计量的压力。

2）相对压力或表压力 p_g　以大气压力为基准计量的压力。

$$p_g = p - p_a$$

式中：p_a——当地大气压力。

3）真空 p_v　若绝对压力低于大气压力，即表压力为负值，称为真空。

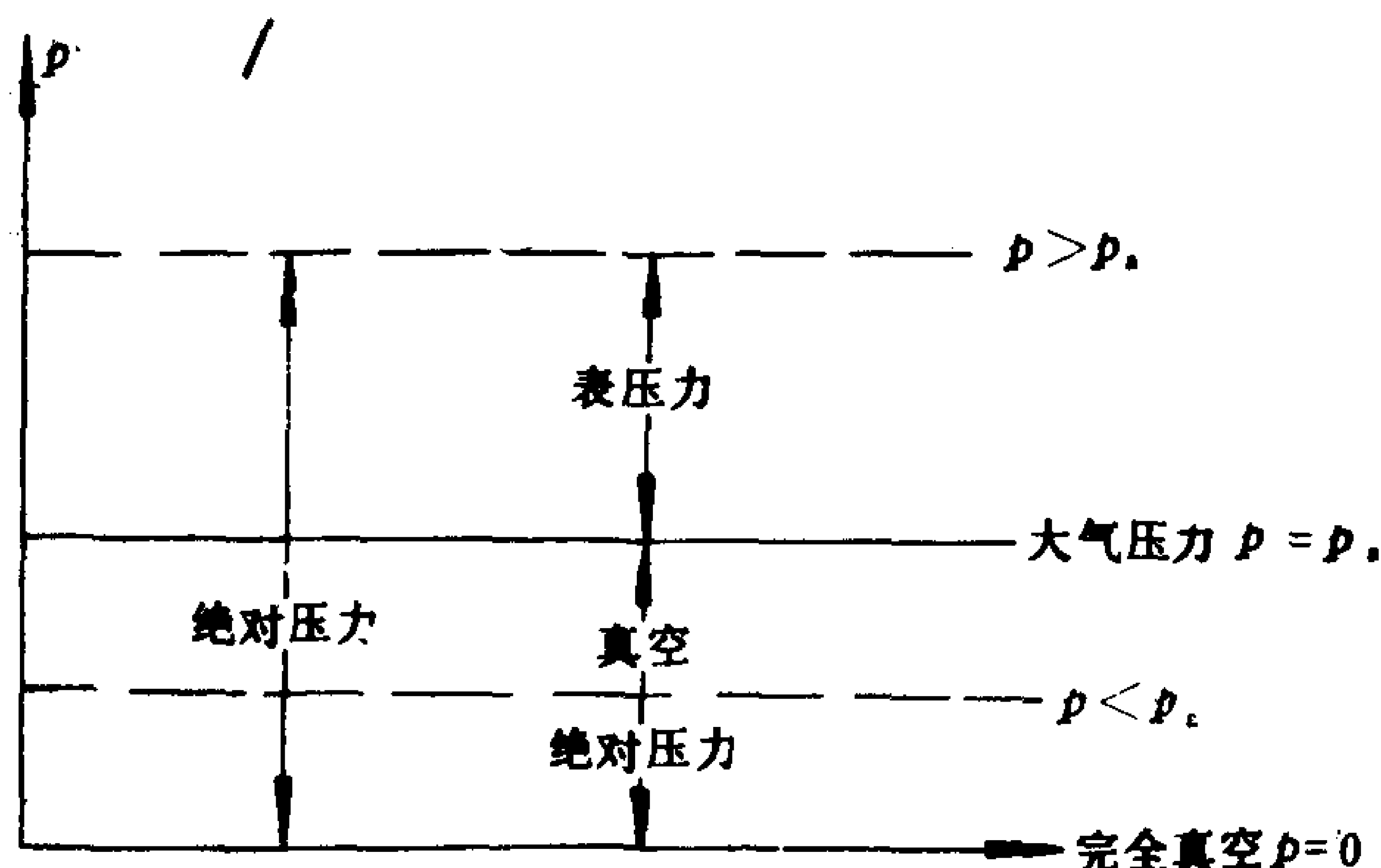


图 1.1.3-5　绝对压力、大气压力、表压力和真空的相互关系

$$p_v = p_a - p = -p_g$$

绝对压力，表压力和真空的关系见图 1.1.3-5

2.1.4　压力的单位

1）国际单位制压力单位

国际单位制压力单位为牛顿/米^2（N/m^2）；也可用帕斯卡（Pa）表示，它的 1000 倍为千帕斯卡（kPa）。

$$1\,Pa = 1\,N/m^2,\quad 1\,kPa = 1000\,N/m^2$$

暂时与国际单位并用的压力为单位还有巴（bar）它的$\frac{1}{1000}$为毫巴（mbar）。

$$1\,bar = 10^5 Pa,\quad 1\,mbar = 100 Pa$$

2）工程单位制压力单位

（1）以单位面积上所受的总压力表示，其单位为公斤力/厘米^2（kgf/cm^2）或公斤力/米^2（kgf/m^2）

$$1\,kgf/cm^2 = 10^4 kgf/m^2$$

（2）以大气压力的倍数表示，其单位为标准大气压或工程大气压。国际上规定标准大气压为温度为 0 ℃时，在纬度 45°处海面上的绝对大气压力，其值为 1.033 kgf/cm^2，而在工程上，为计算方便，规定工程大气压的值为 1 kgf/cm^2。标准大气压用atm表示，工程大气压用at表示。

$$1\,atm = 1.033\quad kgf/cm^2$$
$$1\,at = 1\quad kgf/cm^2$$

（3）以液柱高度表示，其单位为米水柱（mH_2O）或毫米水银柱（mmHg）。

压力单位由 p（kgf/m^2或N/m^2）换算成液柱高度 h（米液柱）的关系式为 $h=\frac{p}{\rho g}$。

压力单位的换算关系见本卷附录 1－9。

2.2 研究流体流动的两种方法

流体运动都是在一定的空间内进行的，通常把流体流动所占据的空间称为流场。

2.2.1 拉格朗日法和欧拉法

1)拉格朗日法　从研究每一流体质点的运动规律来研究整个流动的方法称为拉格朗日法。按照这种方法研究整个流动问题，归结为研究每一流体质点的速度，压力等流动参数随时间的变化及所有流体质点流动参数间的相互关系问题。

2)欧拉法　借研究被流体质点所占据的各个空间点上的流动参数，来研究整个流动的方法称为欧拉法。按照这种方法研究整个流动问题，归结为研究每一空间点上的流动参数，如，速度v，压力P，重度ρ，温度T等随时间t变化及所有空间点上的流动参数间的相互关系问题，即

$$
\begin{aligned}
v &= v(x,y,z,t) \\
p &= p(x,y,z,t) \\
\rho &= \rho(x,y,z,t) \\
T &= T(x,y,z,t)
\end{aligned}
$$

式中：x,y,z,t称为欧拉变数。

用欧拉法研究流体的流动，就是研究速度压力、密度、温度等矢量场和标量场。这种方法是流体力学通常采用的方法。

2.2.2 体系和控制体

1)体系　某些确定的一团流体质点的集合。在流动过程中，这一团流体质点的边界面常常是不断地变形，其上可以有力的作用和能量的交换，但质量不随时间改变。跟随体系来研究流体的运动是拉格朗日法的体现。

2)控制体　流场中某一个确定的空间区域，包围这个区域的边界面称为控制面。它是根据流动的情况和边界位置任意选定，选定之后，它就不随流动的情况而改变，这是与体系的根本区别。引用控制体的概念，在分析问题时，就可以把注意力放在确定的控制体上，去研究流体流过控制体时诸参数的变化情况，以及控制体内流体与控制体外的相互作用。用控制体来研究的流动是欧拉方法的体现。

2.3 流体运动的分类

根据欧拉方法，可以按照流体流动参数所依赖的自变量的数目对流动加以分类。

2.3.1 定常流动和非定常流动

流场中各处的速度、压力、密度和温度等物理量都不随时间而改变的流动，称为定常流动（稳定流动）；反之，为非定常流动（非稳定流动）。

2.3.2 一元、二元和三元流动

一元流动为流动参数v,p,ρ,T等都只与一个坐标有关的流动。例如，流体在管道中的流动，一般可以按以管轴为坐标轴的一元流动来处理，这时截面上的速度取平均流速。

二元流动（平面流动）为流动参数与两个坐标有关的流动。例如，流体绕过一个无限长的直机翼的流动可作为二元流动。这时，在垂直于翼展方向的各个平面的流动情况完全相同，如图 1.1.3-6 a）所示。

轴对称流动为流体在通过固定轴ox的诸平面内的流动情况完全相同(图 1.1.3-6 b)。如

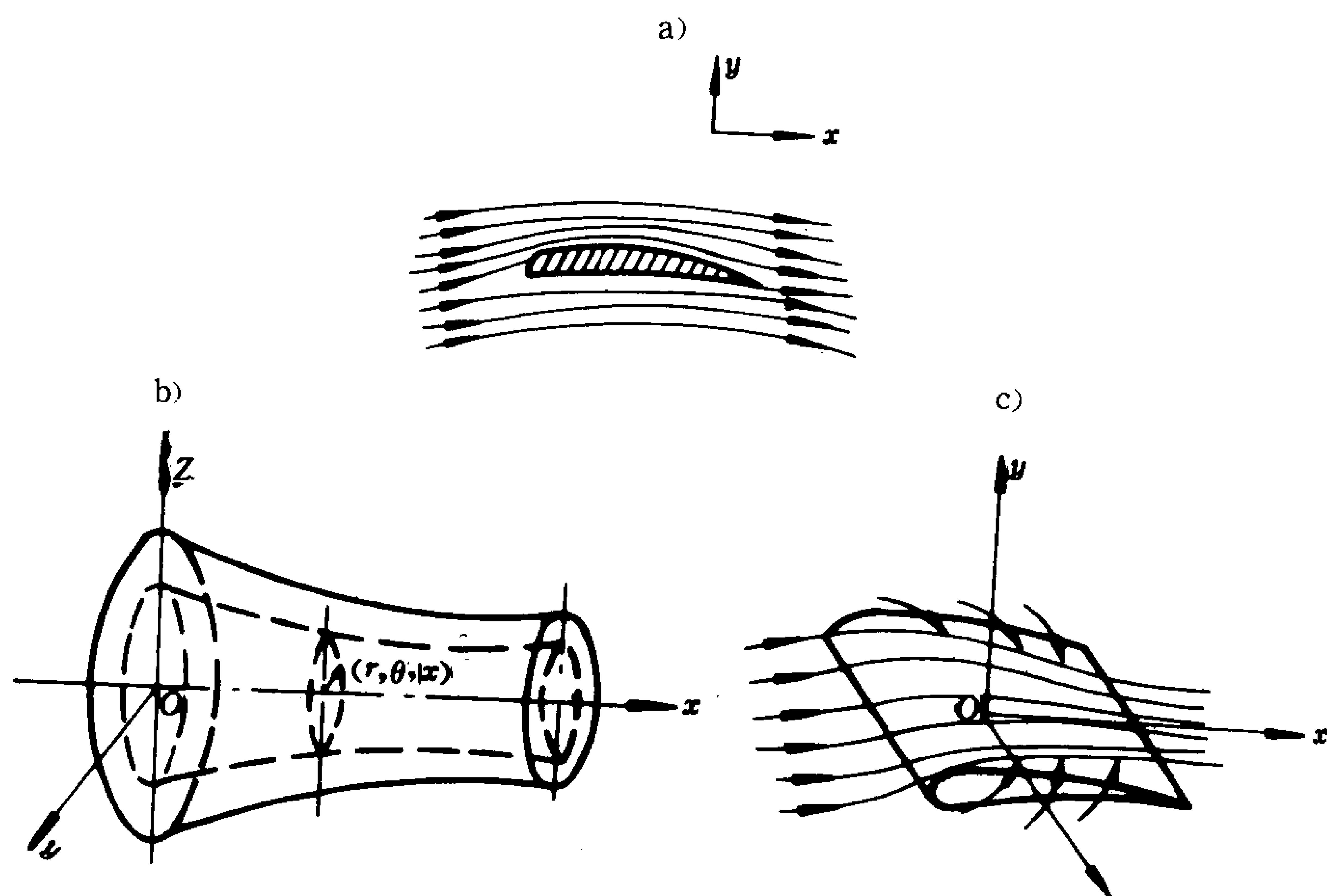


图 1.1.3-6　二元流动和三元流动
a) 二元机翼；b) 轴对称流；c) 三元机翼

果采用柱坐标系(r,θ,x)且使ox轴与对称轴重合，则流动情况与坐标θ无关，且切向速度$v_\theta=0$。空间轴对称流动实际为柱坐标系中的二元流动。

三元流动为流动参数与三个坐标有关的流动。例如，流体绕有限长翼展机翼的流动是三元流动（图 1.1.3-6 c)。

2.4　迹线、流线、流谱、流管、流量和平均流速

1) 迹线　流体质点的运动轨迹。

2) 流线　在给定时刻，曲线上每一点的切线都和位于该点的流体质点的流速矢量相重合，则该曲线称为流线。

流场中除奇点外，流线不能相交，在定常流动中流线与迹线重合。

3) 流谱　在流场中，流线族的几何图形。流谱可以描述流场的概貌(图 1.1.3-7)。流线各点的切线方向为该点流速方向；流线的疏密表示流速的大小，对于不可压缩流体流动，同一流场中流线密的地方表示流速大；反之，流速小。

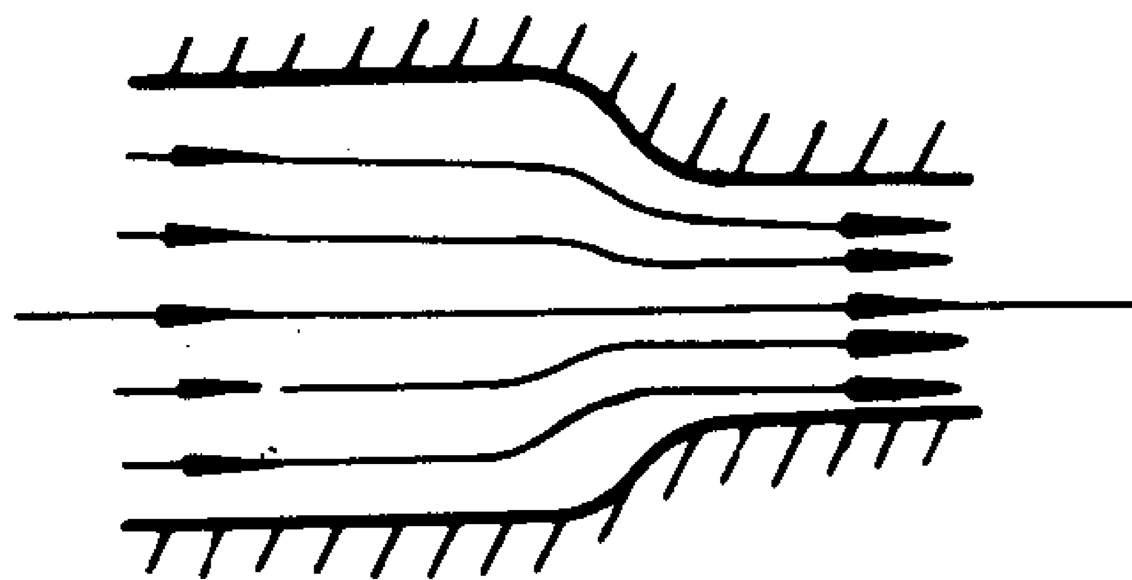


图 1.1.3-7　流谱

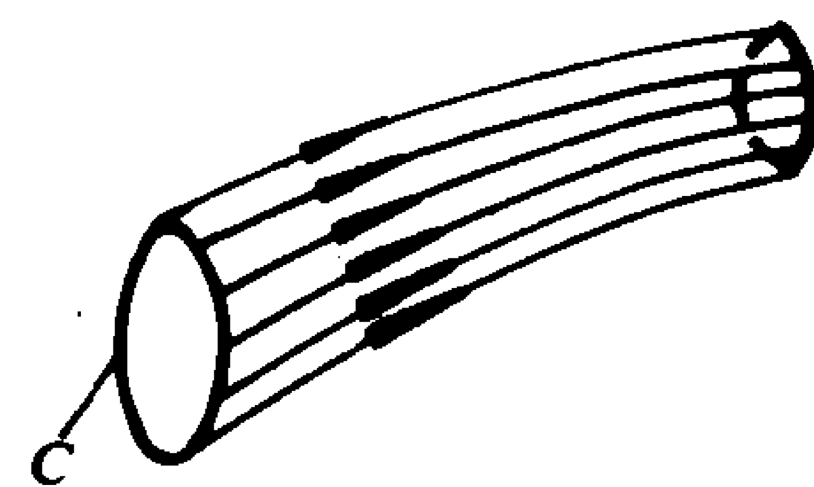


图 1.1.3-8　流管

4) 流管　在流场中划一任意封闭曲线C(不是流线)。通过曲线C的每一点作一流线，这些流线便形成一个管状表面称为流管(图 1.1.3-8)。若流管的横断面尺寸为无限小时，则这种流管称为基元流管。在基元流管的任一横断面的流动参数可以认为是均一的。

与流线相垂直的流管横断面为过水断面。一般流管的过水断面不是平面，只有等断面流管或基元流管的过水断面才是平面。

5)流量　单位时间内，通过过水断面的流体体积或质量，称为体积流量Q或质量流量Q_m，即

$$Q=\int_A vdA \quad m^3/s$$
$$Q_m=\int_A \rho vdA \quad kg/s \qquad (1.1.3\text{-}21)$$

式中：A——过水断面积，m^2；

v——过水断面上微元面积上的流速，m/s。

6)平均流速　过水断面上各点上的流速v对面积取平均值。即

$$U=\frac{\int_A vdA}{A}=\frac{Q}{A} \qquad (1.1.3\text{-}22)$$

因此，平均流速是流经过水断面的体积流量除以过水断面积而得到的商。

2.5　有旋流动和无旋流动

2.5.1　有旋流动

流体质点存在绕自身瞬时轴旋转的流动，称为有旋流动。例如，流体绕流物体时，靠近物体表面的边界层及尾部流动区域就是有旋流动。

流体有旋流动用角速度矢量$\vec{\omega}$来表示，它与速度矢量$\vec{v}$的关系

$$\vec{\omega}=\frac{1}{2}rot\,\vec{v} \qquad (1.1.3\text{-}23)$$

在直角坐标系中

$$\left.\begin{aligned}\omega_x&=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_z}{\partial y}-\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)\\ \omega_y&=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}-\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)\\ \omega_z&=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_y}{\partial x}-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)\end{aligned}\right\} \qquad (1.1.3\text{-}24)$$

式中：v_x，v_y，v_z——速度v在x，y，z轴上的分量。

2.5.2　无旋流动

流体质点的旋转角速度等于零的流动，称为无旋流动或有势流动。即

$$\omega_x=\omega_y=\omega_z=0$$

或　$$\frac{\partial v_z}{\partial y}=\frac{\partial v_y}{\partial z};\quad \frac{\partial v_x}{\partial z}=\frac{\partial v_z}{\partial x};\quad \frac{\partial v_y}{\partial x}=\frac{\partial v_x}{\partial y}$$

流体绕流物体时，除靠近物面的附面层和尾流区域以外，可作为无旋运动来处理。

2.5.3　涡线、涡管和旋涡强度

1)涡线　在给定时刻，每一点都和位于该点的流体质点的角速度矢量相切的线。

2)涡管　在给定时刻，通过不是涡线的封闭曲线上的每一点作涡线所构成的管子。无限细小的涡管称为涡束。

在定常流动中，涡管和涡束的形状不随时间而变化。

3)旋涡强度　涡管的强弱一般用旋涡强度K来度量，其数值为角速度ω与涡管横断面积A_n的乘积的两倍。即

$$K=2\omega A_n \qquad (1.1.3\text{-}25)$$

式中：A_n——涡管横断面积，它与角速度矢量$\vec{\omega}$相垂直。

2.5.4 速度环量 速度环量与旋涡强度的关系

给定时刻，流速在任意曲线l上的切向分量v_l和与其相应的微元长度dl的乘积$v_l dl$，沿曲线l的积分$\int_l v_l dl$，称为速度环量Γ，即

$$\Gamma=\int_l v_l dl=\int_l \vec{v}\cdot\vec{dl}=\int_l(v_x dx+v_y dy+v_z dz) \qquad (1.1.3\text{-}26)$$

逆时针方向为正，反之为负。

速度环量与旋涡强度的关系为：沿空间任意封闭曲线l的速度环量Γ等于通过此曲线l所张的面积A上的旋涡强度（图 1.1.3-9）。此关系称为斯托克斯定理，其表达式为：

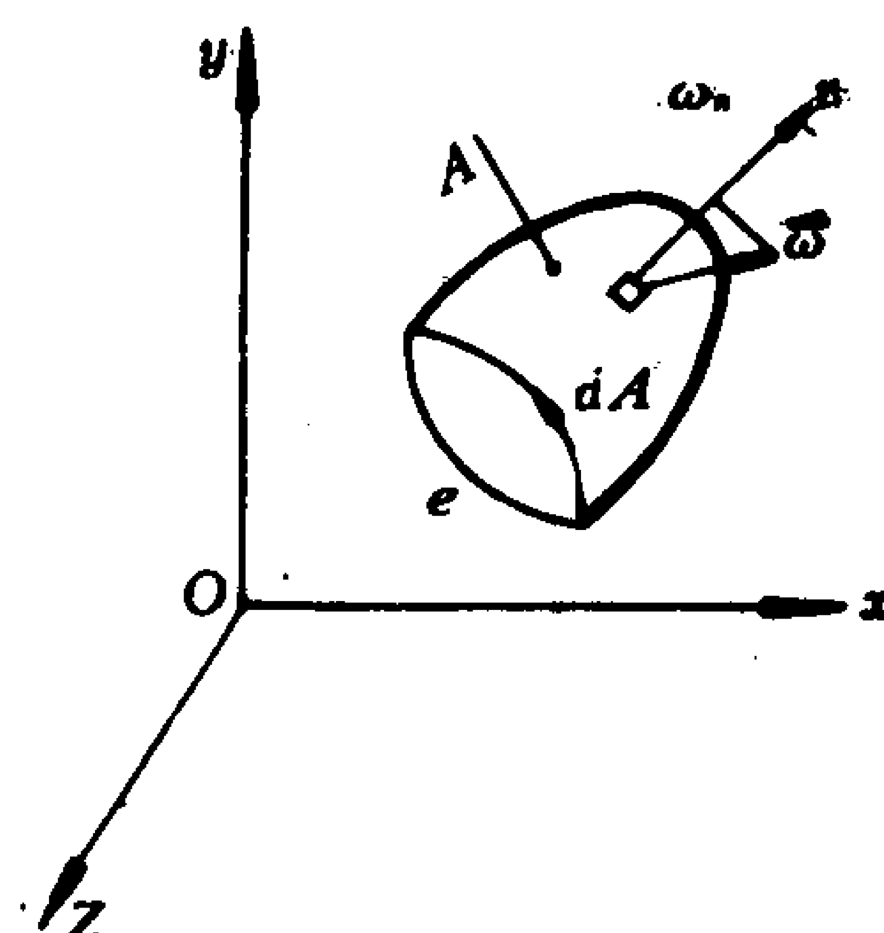
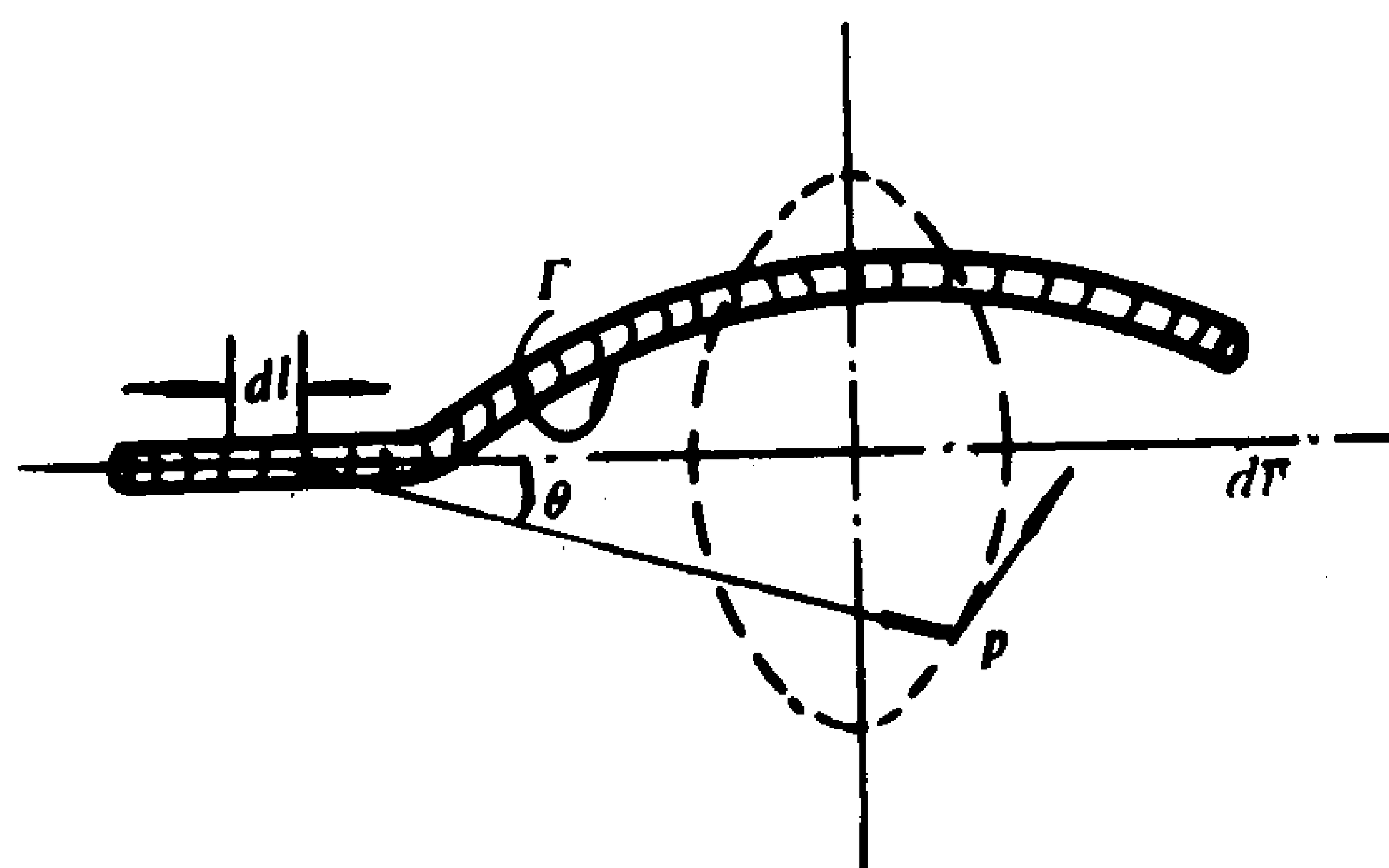
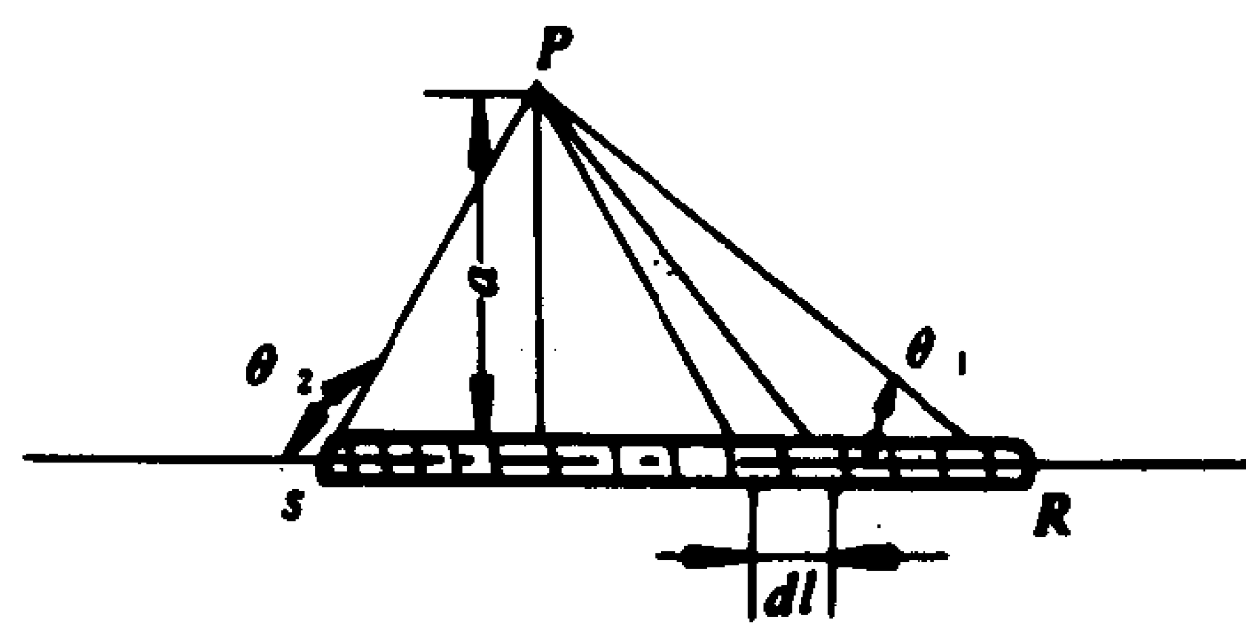


图 1.1.3-9 斯托克斯定理



a）任意形状涡束



b）直线段涡束

图 1.1.3-10

$$\Gamma=\int_l \vec{v}\cdot\vec{dl}=2\iint_A \omega_n dA \qquad (1.1.3\text{-}27)$$

式中：ω_n——角速度矢量$\vec{\omega}$在面积A的外法线方向的投影。

2.5.5 旋涡诱导速度

由旋涡运动而引起周围流体的速度，称为诱导速度。根据流体力学与电磁学比喻法，可得强度为Γ的涡束对空间任意点P（图 1.1.3-10 a）所产生的诱导速度计算公式：

$$dv=\frac{\Gamma\sin\theta dl}{4\pi r^2} \qquad (1.1.3\text{-}28)$$

式中：dl——涡束的微分长度，m；

Γ——涡束的速度环量，m^2/s；

dv——距这根微分涡束r的某点P的微分诱导速度，m/s。

对于直线涡束（图 1.1.3-10 b）

$$v=\frac{\Gamma}{4\pi a}(\cos\theta_1-\cos\theta_2) \qquad (1.1.3\text{-}28\text{ a})$$

式中：a——某点P到涡束的距离。

对于半无限长涡束

$$v=\frac{\Gamma}{4\pi a} \tag{1.1.3-28 b}$$

对于无限长涡束

$$v=\frac{\Gamma}{2\pi a} \tag{1.1.3-28 c}$$

2.6 层流和湍流

2.6.1 层流

流体质点作有规律的运动，在运动过程中相邻流体质点的迹线互不交错，流体是一层层地运动着，称为层流流动。

圆管中的层流流动，其横断面上的流速分布$v=f(r)$是按抛物线规律，并且平均流速U等于最大流速（管轴处）v_{max}的一半（图 1.1.3-11）。流体层之间所产生的切应力τ值，可用牛顿内摩擦定律$\tau=\mu\frac{dv}{dr}$来计算。

2.6.2 湍流

流体质点作毫无规则的混乱的运动，每个流体质点的迹线具有十分复杂的形状，并且相互交错，这种流动称为湍流流动（或紊流）。

1)湍流的脉动现象、时均值和湍流度

（1）湍流的脉动现象与时均值

湍流流动时，空间任一点上的流动参数都是随时间变化，并且是极不规则的，这种现象称为脉动现象。湍流是一种非定常流动。

对于湍流流动，要研究每一瞬时的流动参数的瞬时值是很困难的。通常都是研究流动参数的时间平均值。图 1.1.3-12 所示，圆管中任意一点上的轴向瞬时速度随时间的变化曲线，如果在时间间隔Δt内求该速度的平均值，称为时均速度。即

$$\overrightarrow{v_x}=\frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t} v_x dt \tag{1.1.3-29}$$

即时均速度值等于瞬时速度曲线在Δt间隔中的平均速度。

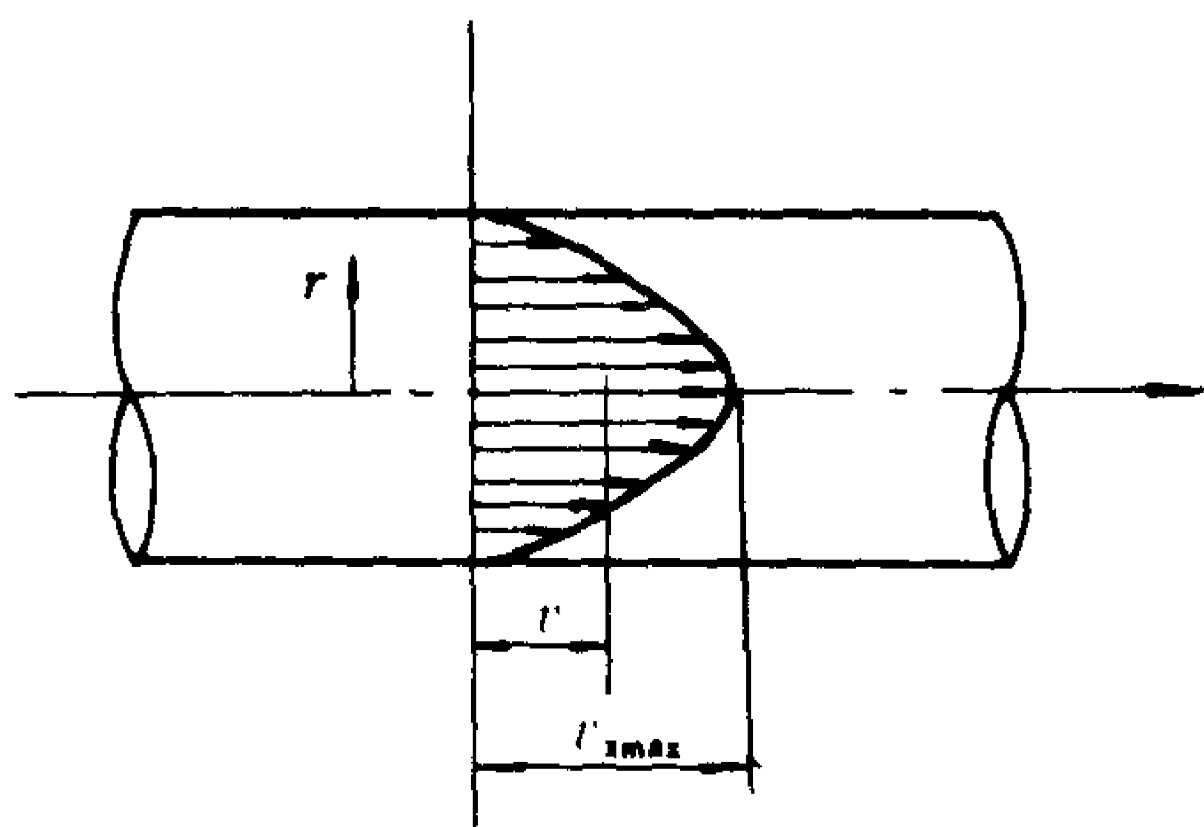


图 1.1.3-11　圆管中层流速度分布

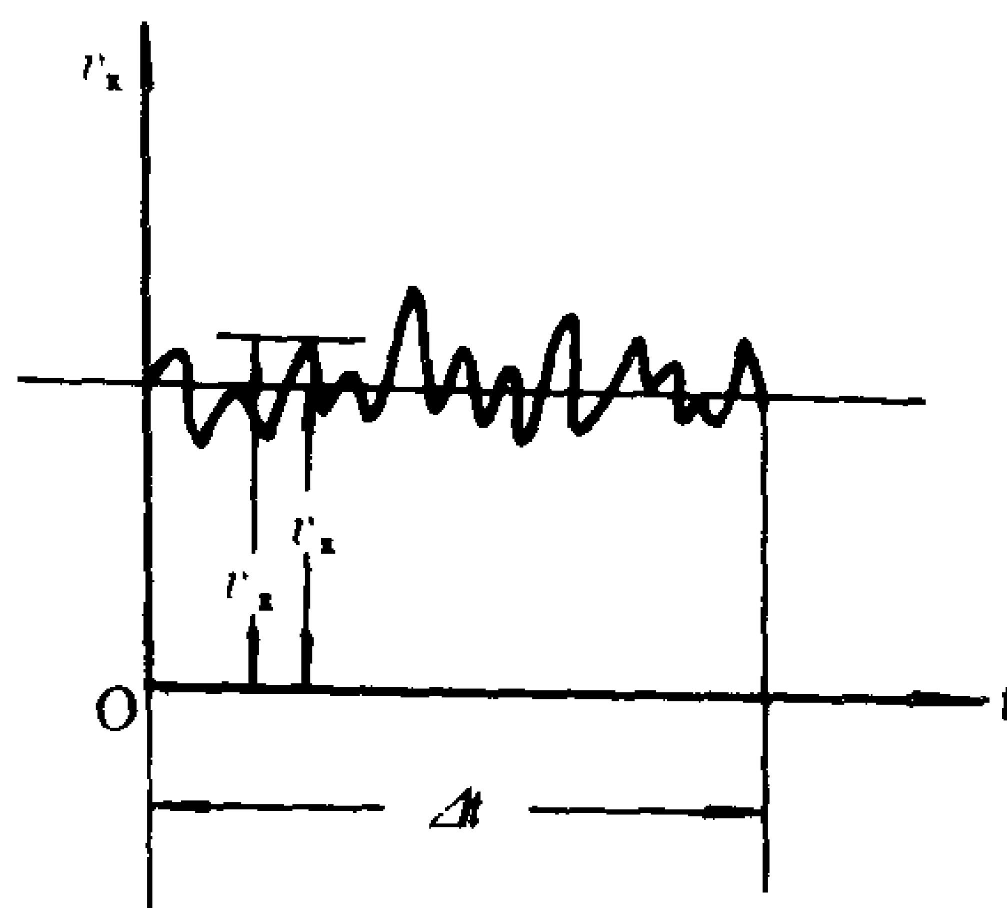


图 1.1.3-12　瞬时轴向速度与时均速度

对于圆管的某点的横向时均速度当零，即：

$$\bar{v}_y=\frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t}v_y dt=0$$

$$\bar{v}_z=\frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t}v_z dt=0$$

一般情况下，空间流动的瞬时速度为：

$$v_x=\bar{v}_x+v'_x;$$
$$v_y=\bar{v}_y+v'_y$$
$$v_z=\bar{v}_z+v'_z$$

式中：v'_x，v'_y，v'_z——分别为x,y,z,轴向的脉动速度。

类似地，在湍流流动中，流体的压力等也处于脉动状态，瞬时压力也可表示为时均压力与脉动压力之和，即

$$p=\bar{p}+p'$$

处理湍流流动问题时，通常以时均流动参数代替瞬时流动参数，即将湍流看作具有时均流动参数的流动（定常流动）。

（2）湍流度　湍流的强度称为湍流度（紊流度）。它的定义为

$$\varepsilon_T=\frac{1}{\bar{v}}\sqrt{\bar{v}'^2_x+\bar{v}'^2_y+\bar{v}'^2_z} \tag{1.1.3-30}$$

式中：$\bar{v}=\sqrt{\bar{v}_x^2+\bar{v}_y^2+\bar{v}_z^2}$——时均值；

$$\sqrt{v'^2_x}=\sqrt{\frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t}v'^2_x dT}$$

——脉动速度v'_x的均方根值。

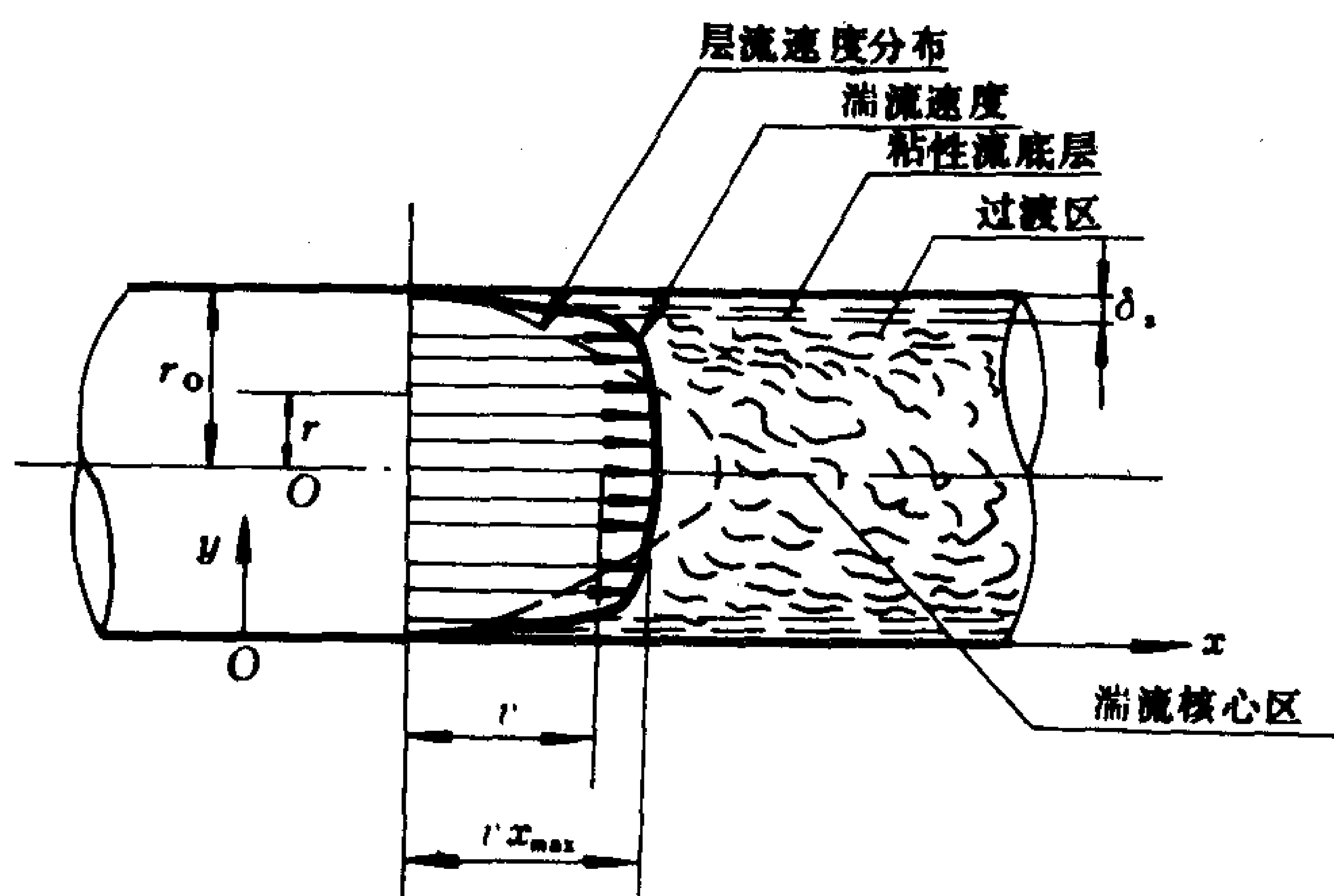


图 1.1.3-13　圆管中湍流的三个区域和速度分布

2）湍流中的速度分布、切应力和粘性底层

（1）粘性底层　流体在圆管中湍流流动时绝大部分流体处于湍流状态，但是，紧贴固体壁面有一层很薄的流体，受壁面的限制，脉动运动完全消失，保持着层流状态，这一薄流体层称为粘性底层。可见，湍流流动可以分为三部分(图 1.1.3-13)，即紧靠壁面的层流底层部分，湍流充分发展的中心部分（湍流核心）以及由层流到湍流核心区的过渡部分。

粘性底层的厚度δs与流动雷诺数Re成反比。它的厚度虽然只有几分之一毫米．但对流动阻力和传热能力的影响极大。

（2）圆管中湍流的速度分布和切应力

在湍流中，由于存在流体质点相互混杂的现象，使得同一断面上各点上的时均速度的差别较小，即速度分布比较均匀，因而速度分布曲线比层流的饱满得多，但在紧贴固体壁面的流体层（粘性底层）时，流速增长很急剧（接近直线规律）。实验证明，光滑圆管的速度分布可用指数曲线（图 1.1.3-13）表示

$$\bar{v}_x/\bar{v}_{xmax}=(y/r_0)^{1/7} \quad (1.1.3\text{-}31)$$

断面上的平均速度$\bar{v}_x$等于最大时均速度$\bar{v}_{xmax}$的0.75～0.9倍。

湍流中的切应力与层流不同。在湍流中，除了因流体的粘性而产生的切应力之外，还由于流体质点作复杂的无规则的运动，在流体层之间引起的动量交换而产生的附加湍流切应力（雷诺应力），致使湍流流动阻力损失要比层流为大。

2.7 雷诺数和临界雷诺数

1)雷诺数是一个表征流体惯性力与粘性力之比的无量纲数，即

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho Ul}{\mu}=\frac{Ul}{\nu} \quad (1.1.3\text{-}32)$$

式中：U——流体的特征速度，如管流中通过过水断面上的平均速度，m/s；

l——物体的特征长度，在圆管中流动为圆管的内径，m；

ρ——流体的密度，kg/m^3；

μ,ν——分别为流体的动力粘度，$N\cdot s/m^2$和运动粘度，m^2/s。

雷诺数很小时，粘性力占主导地位；反之，雷诺数较大时，惯性力占主导地位，这时粘性力只对流体与固壁接触面附近或速度梯度较大的流动区域有较大影响。

2)临界雷诺数　层流转变为湍流或湍流转变为层流时的雷诺数。由层流转变为湍流的雷诺数为上临界雷诺数，以$\mathrm{Re}_{cr}=\frac{U_{cr}l}{\nu}$表示，$U_{cr}$为临界速度；反之为下临界雷诺数。通常用下临界雷诺数Re_{cr}作为判别流动状态是层流还是湍流的准则数。

当$\mathrm{Re}<\mathrm{Re}_{cr}$时，流动为层流；当$\mathrm{Re}>\mathrm{Re}_{cr}$时，流动为湍流。

几种常见流动情况下的临界雷诺数见表1.1.3-13。

表1.1.3-13　临界雷诺数

流动情况	Re_{cr}
在内径为d的圆断面管内流动	$\mathrm{Re}_{cr}=\frac{U_{cr}d}{\nu}=2300$
在水力直径为d_s的任意断面管内流动	$\frac{U_{cr}\cdot d_s}{\nu}=2000$
在缝宽为δ的环形缝隙内流动	$\frac{U_{cr}\cdot\delta}{\nu}=1000$
在缝宽为δ的平板缝隙内流动	$\frac{U_{cr}\delta}{\nu}=1000$
在沿平板长度为b的流动	$\frac{U_{cr}\cdot b}{\nu}=3.5\sim5\times10^5$

2.8 湿周和水力直径

1)湿周　如图1.1.3-14所示，过水断面A上被流体浸润的固壁周线长称为湿周。当流体充满时，湿周$x=\pi d$（d为管内径）；当流体不充满时，x按实际浸润的固壁周线长度来计算。

2)水力直径　4倍过水断面面积与湿周之比，即

$$d_s=\frac{4A}{x} \quad (1.1.3\text{-}33)$$

不同形状的过水断面的水力直径见表1.1.3-14

表 1.1.3-14　　不同形状过水断面的水力直径

断面形状						
水力直径	d	h	$\frac{2hb}{h+b}$	$\frac{b}{\sqrt{3}}$	d_1-d_2	$2h$

注：适用于满管流动。

2.9　声速和马赫数

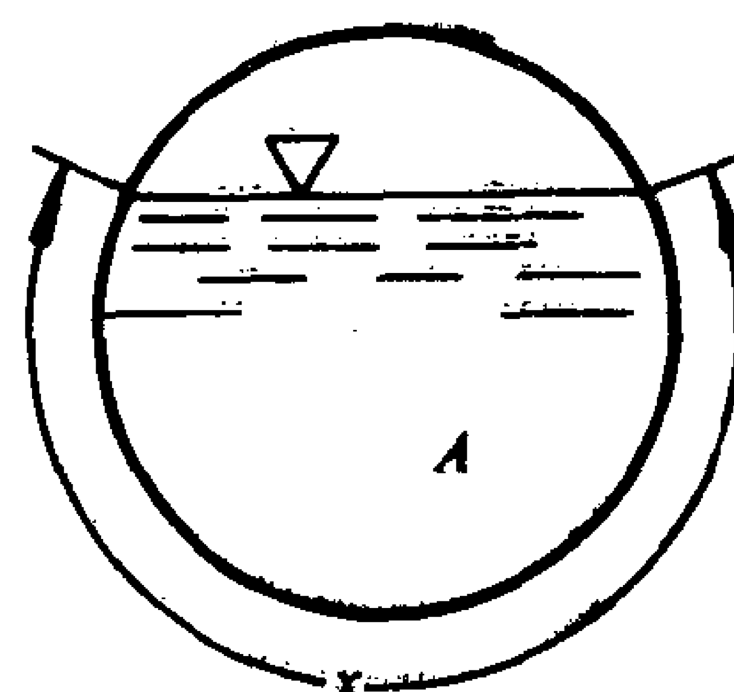


图 1.1.3-14　湿周

1）声速　流体受微弱扰动时，将产生压力、密度等的微小变化，并向四周传播，这种微小的压力波的传播速度称为声速。气体的声速表达式为

$$C=\sqrt{\frac{kp}{\rho}}=\sqrt{kRT}\quad \text{m/s} \tag{1.1.3-34}$$

式中：p——气体的压力，N/m^2；

ρ——气体的密度，kg/m^3；

T——气体的绝对温度，k；

R——气体常数，$Nm/kg \cdot K$；

k——气体绝热指数。

如不计k随温度的变化，在任意温度T下的气体声速可按下式计算

$$C/C_{to}=\sqrt{\frac{T}{273}} \tag{1.1.3-35}$$

$$C=K_C\sqrt{T}\quad \text{m/s} \tag{1.1.3-35 a}$$

式中：C_{to}——温度为 0 ℃的气体声速，m/s；

K_C——气体的声速常数，$m \cdot s^{-1} \cdot k^{-\frac{1}{2}}$。

一些气体的声速常数见表 1.1.3-15。

表 1.1.3-15　　气体的声速常数

气体名称	气体常数 R Nm/kg·K	绝热指数 k	声速 C_{to} m/s	声速常数 K_C $ms^{-1}k^{-\frac{1}{2}}$
空气	287.06	1.4	332	20
氢	4089	1.42	1261	76.2
氦	2745.4	1.64	1110	67.1
氮	297	1.4	337	20.4
二氧化碳	188	1.295	258	15.6

2）马赫数　气体的速度与该气体当地声速之比，即

$$M=\frac{v}{c} \tag{1.1.3-36}$$

马赫数M值反映气体压缩性对流动的影响。当$M<1$时为亚声速流动，当$M=1$时为跨声速流动，当$M>1$时为超声速流动。

对于$M<0.3$的气体流动，其密度相对变化量很小，可作为不可压缩流体来处理。

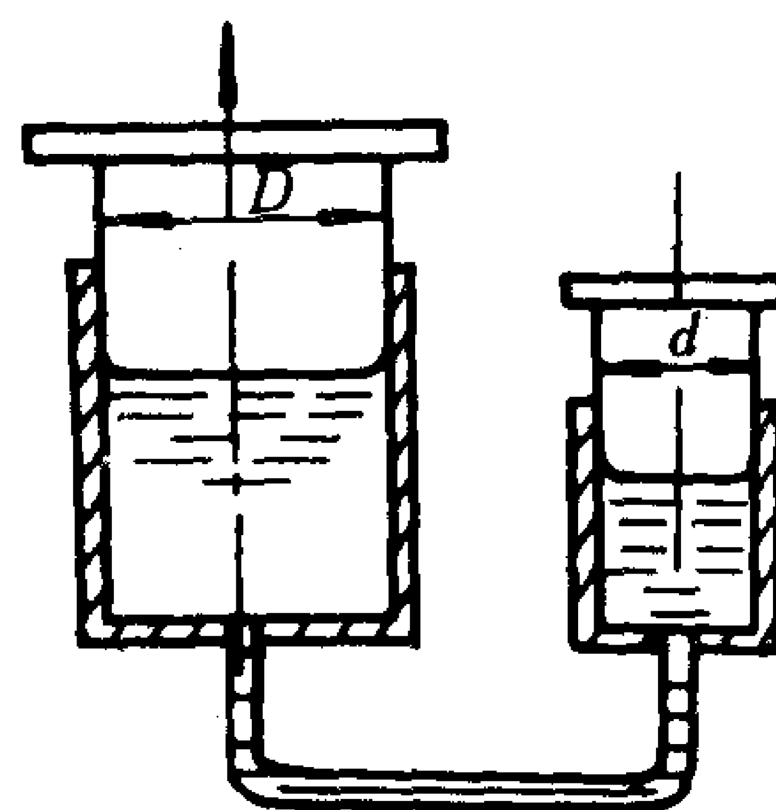


图 1.1.3-15　帕斯卡定律

3　静止流体

3.1　流体静压力及其特性

当流体处于静止或相对静止状态时，流体压力称为流体静压力。

流体静压力有两个重要特性：（1）静压力的方向沿作用面的内法线方向；（2）静止流体中任一点的压力值与其作用面在空间的方位无关，只是该点坐标的函数。

3.2　静止流体的压力分布规律、等压面

3.2.1　静止流体的压力分布规律

在只有重力作用的静止流体中任一点的力可按下式计算：

$$p=p_0+\rho gh \qquad (1.1.3\text{-}37)$$

式中：p_0——自由液面上的压力，对于开口容器即大气压力，$p_0=p_a$，N/m²；

h——某点距自由面的深度，m，称为淹深；

g——重力加速度，m/s²；

ρgh——高为h的单位面积的流体柱的重力，N/m²。

3.2.2　等压面　在平衡的流体中静压力相等各点所组成的面积称为等压面。重力作用下的静止液体中的等压面为水平面，自由液面便是等压面。

3.3　帕斯卡定律

在密闭容器内充满流体，在流体的边界上施加某一压力，则此压力会均匀不变地传递到流体的各点上去，这称为帕斯卡定律。

帕斯卡定律是各种液压机工作原理的基础。如图 1.1.3-15，在一密闭的液体系统内，当小活塞上加一总压力P_1，则大活塞上将得到一个较大的总压力P_2，即：

$$P_2=P_1\left(\frac{D}{d}\right)^2 \qquad (1.1.3\text{-}38)$$

3.4　液柱式测压计

液柱式测压计是根据静止流体的压力分布规律制作的。液柱式测压计测量表压，真空压力和压差的图示和压力计算公式见表 1.1.3-16。

表 1.1.3-16　　各种液柱式测压计的图示和计算公式

测压分类	名　称	示　意　图	压力计算公式
测表压	1）U形管压力计	1）	$p=\rho_2 g_2 h_2-\rho_1 g h_1$
		2）	$p=\rho g h$
	2）倾斜微压计	3）	$p=\rho g h(\sin\alpha+\frac{d^2}{D^2})$
测真空	3）U形管压力计	4）	$p=\rho g h$

续上表

测压分类	名　称	示　意　图	压力计算公式
测压差	4）U形管压力计	5）空气P_1；h；1；2；液体 e	$p_1-p_2=(\rho-\rho_1)gh$
		6）P_1；1；2；h_1；h_2；h；P_2	$p_1-p_2=(\rho_2-\rho_1)gh$
	5）双液体差压计		$p_1-p_2=[(\rho_2-\rho_1)+\rho_1\frac{A_2}{A_1}]gh$

3.5 静止液体作用在壁面上的总压力

3.5.1 作用在平面壁上的总压力（图 1.1.3-16）

1）总压力

$$P=(p_g+\rho g h_C)A=(p_g+\rho g y_C \sin\alpha)A$$
$$=p_g A+p_C A=P_g+P' \quad (1.1.3\text{-}39)$$

式中：p_g——自由液面上的表压力，N/m^2；

p_C——面积A的形心C上的液体重力所产生的压力，N/m^2；

h_C——面积A的形心C的淹深，m；

y_C——面积A的形心C距x轴的距离，m；

P'——由液重所产生的总压力，N/m^2。

2）总压力的作用点D或称压力中心

$$
\left.\begin{aligned}
x_D &= \frac{p_g \cdot x_C + \rho \cdot g \cdot y_C \sin\alpha \cdot x'_D}{p_g + \rho g y_C \sin\alpha} \\
y_D &= \frac{p_g y_C + \rho \cdot g \cdot y_C \sin\alpha \cdot y'_D}{p_g + \rho g y_C \sin\alpha}
\end{aligned}\right\} \qquad (1.1.3\text{-}40)
$$

式中：x_C，y_C——分别为面积A的形心C距x,y轴的距离，m；

$x'_D=\frac{I_{xy}}{y_C \cdot A}$——总压力$P'$的作用点$D'$距$y$轴的距离，m；

$y'_D=y_C+\frac{I_C}{y_C \cdot A}$——总压力$P'$的作用点距$x$轴的距离，m；

$I_{xy}=\iint_A xy\,dA$——面积A对x,y轴的惯性积（见本手册第1篇），m^4；

I_C——面积A对通过形心C且与x轴平行的轴的惯性矩，m^4。（见第一篇）

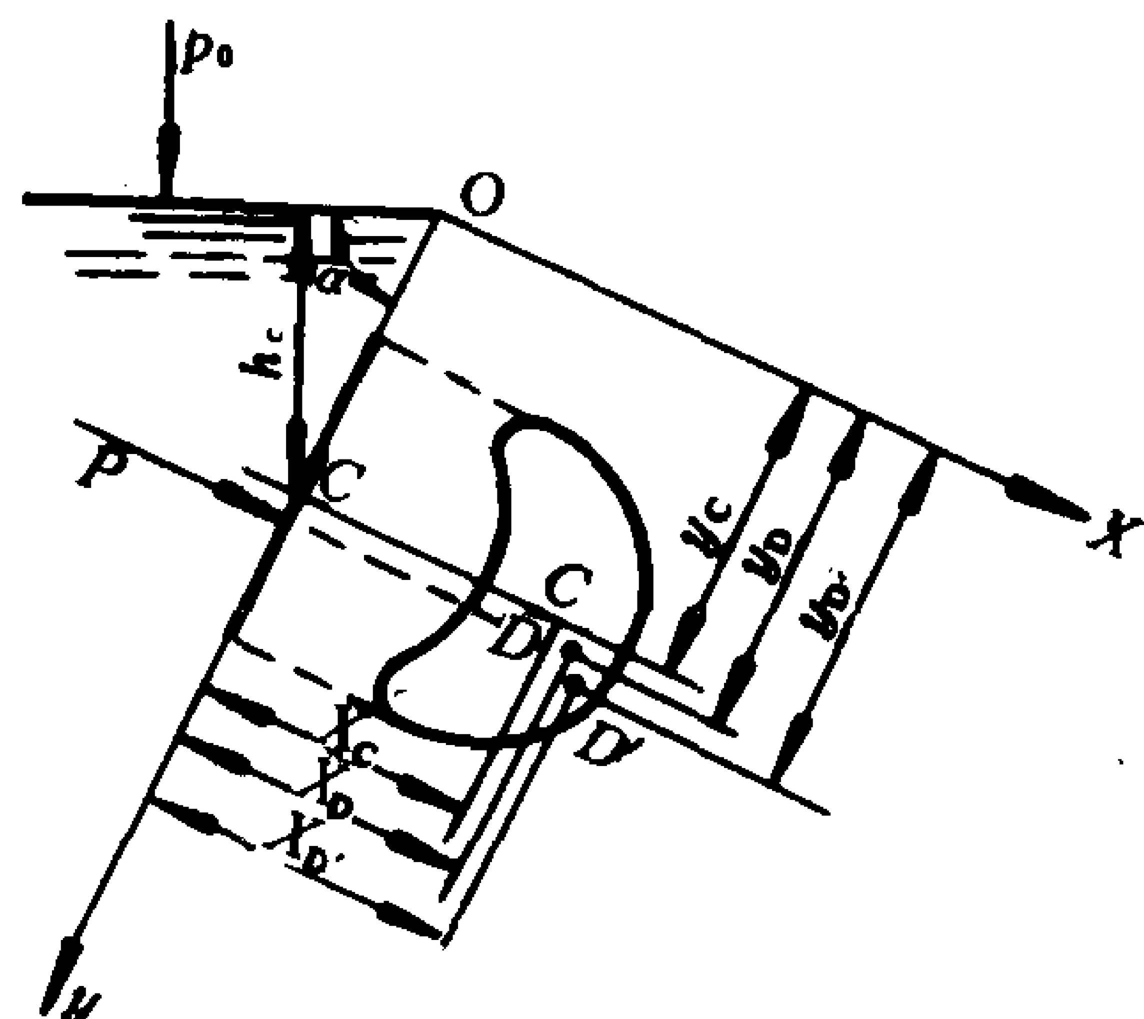


图 1.1.3-16 静止液体作用在倾斜平面壁上的总压力

对于具有对称形状的平面壁，若自由液面在大气压力作用下（$p_g=0$），总压力的值和压力中心的位置计算公式见表 1.1.3-17。

表 1.1.3-17 静止液体作用在有规则形状的倾斜平面壁上的总压力及压力中心

形　状	示　意　图	总压力和压力中心的计算公式
矩形	1）	$P=\rho g b h\left(e+\frac{h}{2}\right)\sin\alpha$ $y_D=e+\frac{h}{2}+\frac{b^2}{6(e+2h)}$
圆形	2）	$P=\rho g \frac{\pi}{4} d^2\left(e+\frac{d}{2}\right)\sin\alpha$ $y_D=e+\frac{d}{2}+\frac{d^2}{8(e+2h)}$

续上表

形　状	示　意　图	总压力和压力中心的计算公式
椭圆形	3)	$P=\rho g\frac{\pi}{4}bh(e+\frac{h}{2})\sin\alpha$ $y_D=e+\frac{h}{2}+\frac{h^2}{8(e+2h)}$
半圆形	4)	$P=\frac{\pi}{8}\rho gd^2\left(e+\frac{2d}{3\pi}\right)\sin\alpha$ $y_D=e+\frac{2d}{3\pi}+\frac{(9\pi^2-64)d^2}{144\pi^2(e+\frac{2d}{3\pi})}$
三角形	5)	$P=\frac{1}{2}\rho gbh(e+\frac{h}{3})\sin\alpha$ $y_D=e+\frac{h}{3}+\frac{h^2}{6(3e+h)}$
梯形	6)	$P=\frac{a+b}{2}\rho gh(e+\frac{1}{3}b\frac{a+2b}{a+b})\sin\alpha$ $y_D=e+\frac{h}{3}\frac{a+2b}{a+b}+\frac{h^2(b^2+4ab+a^2)}{6(a+b)[3e(a+b)+h(a+2b)]}$

续上表

形　状	示　意　图	总压力和压力中心的计算公式
垂直矩形壁	7）	$P=\frac{1}{2}\rho gb(h_1^2-h_2^2)$ $h_0=\frac{1}{3}\frac{2h_1^2+2h_1h_2-h_2^2}{h_1+h_2}$

3.5.2　作用在柱形曲面壁上的总压力

1)总压力的大小及方向

对于如图 1.1.3-17 所示的开口容器，并且曲面壁的外侧在大气压力作用下，总压力的大小及其作用点在自由液面下的淹深

$$\left.\begin{aligned} P_x&=\rho\cdot g\cdot h_C A_z\\ Z_D&=\frac{I_y}{h_C A_z}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.3\text{-}41)$$

式中：　　A_z——曲面ab在z轴上的投影面积；

$I_y=\iint_A z^2 dA_z$——面积A_z对于y轴的面积惯性矩。

总压力的垂直分力及其作用点与y_{DZ}面间的距离为

$$\left.\begin{aligned} P_z&=\rho\cdot g\cdot V\\ x_D&=\frac{\int_V x dv}{V}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.3\text{-}42)$$

式中：V——曲面ab上的液柱体积$abcd$，称为压力体。

总压力的大小及方向

$$\left.\begin{aligned} P&=\sqrt{P_x^2+P_z^2}\\ \mathrm{tg}\theta&=\frac{P_x}{P_z}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.3\text{-}43)$$

2)压力中心　过P_x、P_z的作用线的交点，作与P_z成θ角的直线，该直线和壁面的交点D即为压力中心(图 1.1.3-17)。对于圆柱曲面和球面上的总压力的作用线一定通过圆心。

静止液体作用在圆柱曲壁ab上单位宽度的总压力见表 1.1.3-18。

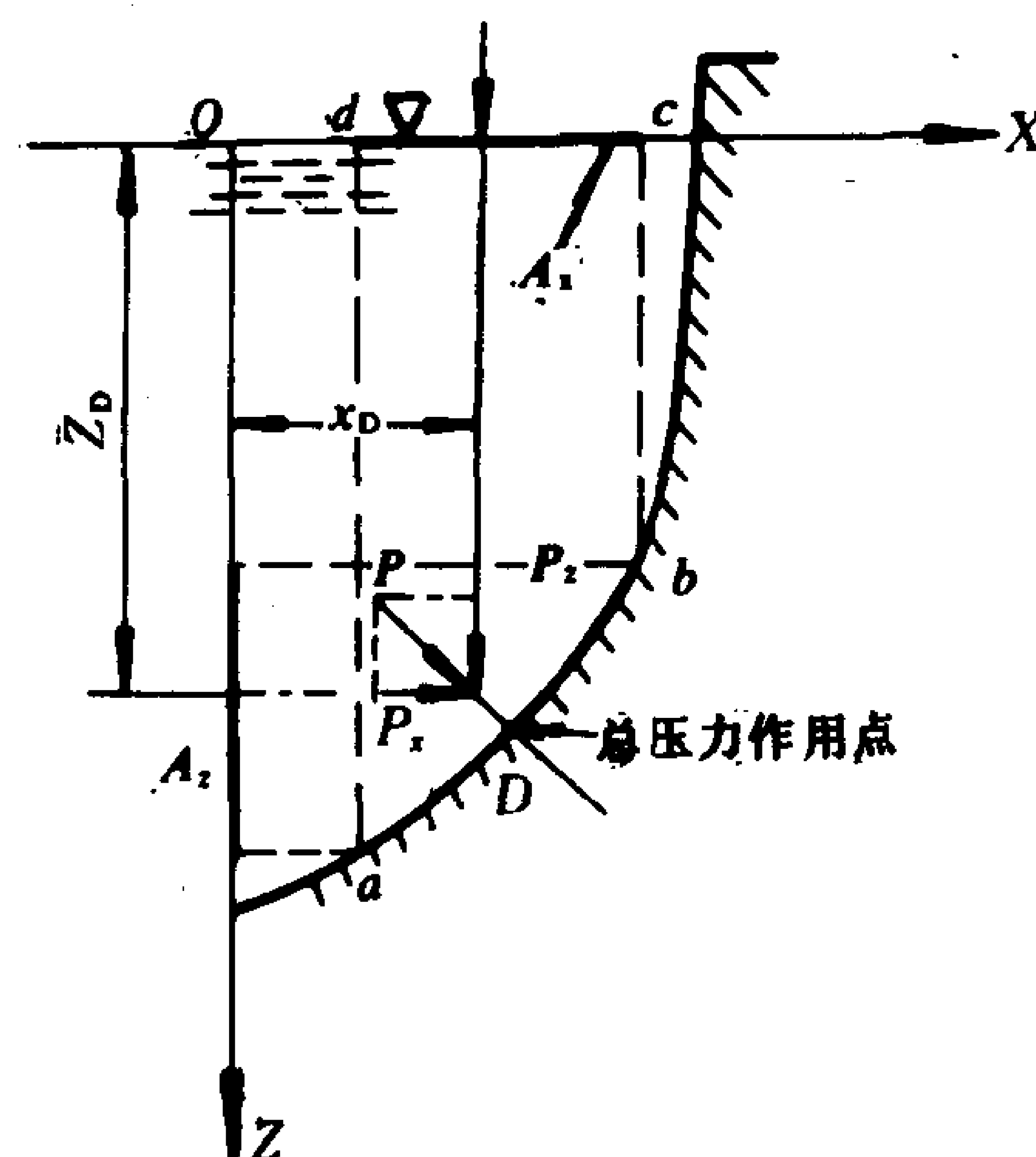


图 1.1.3-17　柱体曲面壁上的液体总压力及作用点

表 1.1.3-18　　静止液体作用在圆柱曲壁ab单位宽度上的总压力

示　意　图	公　　式
1）	$P_x=\frac{1}{2}\rho g(H_2^2-H_1^2)$ $h=\frac{1}{3}H\left(\frac{2H_1+H_2}{H_1+H_2}\right)$ $P_z=\rho g v_{abcd}=\frac{1}{2}\rho gR[(H_1+H_2)(\cos\beta_1-\cos\beta_2)+R(\beta-\sin\beta)]$
2）	$P_x=\frac{1}{2}\rho g(H_2^2-H_1^2)$ $h=\frac{1}{3}H\left(\frac{2H_1+H_2}{H_1+H_2}\right)$ $P_z=\rho g v_{ab}=\frac{1}{2}\rho gR^2(\beta-\sin\beta)$
3）	$P_x=\frac{1}{2}\rho g(H_2^2-H_1^2)$ $h=\frac{1}{3}H\left(\frac{2H_1+H_2}{H_1+H_2}\right)$ $P_z=\rho g v_{abcd}=\rho gR[H_1(1-\cos\beta)+\frac{R}{4}(2\beta-\sin2\beta)]$
4）	$P_x=\frac{1}{2}\rho g(H_2^2-H_1^2)$ $h=\frac{1}{3}H\left(\frac{2H_1+H_2}{H_1+H_2}\right)$ $P_z=\rho g v_{abcd}=\rho gR[H_2(1-\cos\beta)-\frac{R}{4}(2\beta-\sin2\beta)]$

3.6 阿基米德原理

1)阿基米德原理　静止液体作用在沉浸于其中的物体表面上的总压力P_z(浮力)，等于物体所排开的液体的重力，且方向垂直、向上，其作用线通过物体的几何中心（体积重心，称为浮心），即：

$$P_z=\rho gV \qquad (\mathrm{N}) \qquad (1.1.3\text{-}44)$$

式中：ρ——液体的密度，kg/m³；

V——被物体所排开液体体积，m³。

2)物体的潜浮　当物体的重力$G>P_z$时物体下沉至水底；当$G=P_z$时，物体潜于液体中并可平衡于任意位置上，当$G<P_z$时，物体浮出液面，直至沉浸部分所排开的液体重力等于物体的重力。

3.7 相对静止液体的压力

绕铅垂轴以等角速度ω旋转的容器内，相对静止液体的压力分布见表 1.1.3-19。

表 1.1.3-19　　等角速度旋转的容器内，相对静止液体的压力分布

容器类型	液体不溢出也不露底的开口容器	装满液体，顶盖中心开孔的封闭容器	装满液体，顶盖边上开孔的封闭容器
示意图	1)	2)	3)
任一点的压力	$p=p_a+\rho g(\frac{\omega^2r^2}{2g}+z_0-z)$ $z_0=h_0-\frac{\omega^2R^2}{4g}$ $z_{max}=h_0+\frac{\omega^2R^2}{4g}$ h_0——容器静止时的液面高度	$p=p_a+\rho g\left(h+\frac{\omega^2r^2}{2g}\right)$	$p=p_a+\rho g[h-\frac{\omega^2(R^2-r^2)}{2g}]$

4 流体流动的基本方程

4.1 连续方程

连续方程是流体流动时，质量守恒定律的数学表达式，对于理想流体或粘性流体均适用。关于管道流动（一元流动）的连续方程见表 1.1.3-20。

表 1.1.3-20 管道流动的连续方程

	可压缩非定常流动	可压缩定常流动	不可压缩流动
微分式	$A\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho vA)}{\partial s}=0$	$\frac{d\rho}{\rho}+\frac{dv}{v}+\frac{dA}{A}=0$	$\frac{dv}{v}+\frac{dA}{A}=0$
代数式	$\rho_1U_1A_1=\rho_2U_2A_2=Q_m(t)$	$\rho_1U_1A_1=\rho_2U_2A_2=Q_m$=常数	$U_1A_1=U_2A_2=Q$=常数
图示		说明 A——过水断面积； v——任一点的流速； U——过水断面上的平均流速； ρ——过水断面上的平均密度； s——沿轴线方向的坐标； $Q_m(t)$——随时间变化的质量流量。	

4.2 运动方程

运动方程是牛顿第二定律应用于流动流体的一种数学表达式。理想流体的运动微分方程称为欧拉运动微分方程，粘性流体的运动微分方程称为纳维尔—斯托克斯方程。一元流动的运动方程见表 1.1.3-21。

表 1.1.3-21 一元流动的运动方程

流动类型	可压缩非定常流	不可压缩定常流
欧拉运动方程	$\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$	$v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$
纳维尔—斯托克斯方程	$\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{4}{3}\nu\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}$	$v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}$
说明	1）不计质量力；2）运动粘度ν=常数。	

4.3 伯努利方程

伯努利方程是能量守恒定律应用于运动流体的一种数学表达式。

4.3.1 不可压缩流体的伯努利方程

不可压缩流体在重力场中作定常流动时，理想流体、粘性流体的伯努利方程见表 1.1.3-22。

表 1.1.3-22　　　　不可压缩流体的伯努利方程

流动类型	理 想 流 体	粘 性 流 体
沿流线	$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{v_2^2}{2g}=$常数	$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{v_2^2}{2g}+h_v$
沿流管	$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2^2}{2g}=$常数	$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2^2}{2g}+h_v$
图示		

说明

(1) 方程各项的物理意义

z——单位重力流体的位能，又称位置头；

$\frac{p}{\rho g}$——单位重力流体的压力能，又称压力头；$\frac{0}{0}$

$\frac{v^2}{2g}$——单位重力流体的动能，又称速度头；$\frac{0}{0}$

$(z+\frac{p}{\rho g}+\frac{v^2}{2g})$——单位重力流体的机械能，又称总水头。各过水断面的总水头的连线为总水头线，理想流体总水头线为一水平线；粘性流体的总水头线是沿流程单调下降的线；

h_v——单位重力流体的机械能损失。

(2) 上式适用于流体从断面 1 到断面 2，沿流程没有别的能量输入和输出，若有能量输入（水泵或风机）或输出（水轮机），则不可压缩粘性流体的伯努利方程为

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}\pm H_e=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2^2}{2g}+h_v$$

式中，H_e——单位重力流体同外界交换能过程，处界向流体输入能量时式中取“+”反之取“−”。

4.3.2 理想可压缩流体的伯努利方程

理想可压缩流体不计重力影响、定常流动的伯努利方程见表 1.1.3-23。

表 1.1.3-23 理想可压缩流体的伯努利方程

定常等温流动	沿流线或等温线	$RT_0\ln\frac{p_1}{p_0}+\frac{v_1^2}{2}=RT_0\ln\frac{p_2}{p_0}+\frac{v_2^2}{2}$ 或 $\frac{p_0}{\rho_0}\ln\frac{p_1}{p_0}+\frac{v_1^2}{2}=\frac{p_0}{\rho_0}\ln\frac{p_2}{p_0}+\frac{v_2^2}{2}$
定常绝热流动	沿流线	$h_1+\frac{v_1^2}{2}=h_2+\frac{v_2^2}{2}=h_0$ 或 $\frac{K}{K-1}\frac{p_1}{\rho_1}+\frac{v_1^2}{2}=\frac{K}{K-1}\frac{p_2}{\rho_2}+\frac{v_2^2}{2}$ $\frac{v_1^2}{2}+\frac{K}{K-1}\frac{p_0}{\rho_0}[(\frac{p_1}{p_0})^{\frac{k}{k-1}}-1]=\frac{v_2^2}{2}+\frac{K}{K-1}\frac{p_0}{\rho_0}[(\frac{p_2}{p_0})^{\frac{k}{k-1}}-1]$
说明	p_0; T_0; ρ_0——分别为总压力，总温度和总密度，N/m²，K，kg/m³。 h，h_0——单位质量流体的热焓，总焓，N·m/kg。	

4.3.3 相对定常流动的伯努利方程

对于流体在离心泵、涡轮机、通风机等叶轮的流道内流动，如果把坐标固定在作等角速度流动的叶轮上，则流体对转动的叶轮坐标系的相对运动是定常流动。

1)理想不可压缩流体沿流线的伯努利方程（图 1.1.3-18）

$$Z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{w_1^2}{2g}+\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}=Z_1+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{w_2^2}{2g} \quad (1.1.3\text{-}45)$$

式中： w——相对速度，m/s；

u——牵连速度，即圆周速度 $u=\omega\cdot r$,m/s，ω为角速度；

$\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}$——由于牵连运动引起的动能的增量。

2)理想可压缩流体对于定常绝热流动，且不计重力影响时，沿流线的伯努利方程

$$h_1+\frac{w_1^2}{z}+\frac{u_2^2-u_1^2}{z}=h_2+\frac{w_2^2}{z} \quad (1.1.3\text{-}46)$$

式中：h——单位质量气体的热焓，Nm/kg。

4.3.4 非定常粘性不可压缩流体的伯努利方程

粘性不可压缩流体在重力作用下作非定常流动时，同一瞬间沿流管的伯努利方程为

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{Ug}+\frac{U_2^2}{2g}+h_v+\frac{1}{g}\int_{l_1}^{l_2}\frac{\partial U}{\partial t}\times dl \quad (1.1.3\text{-}47)$$

式中：h_v——单位重力流体的机械能换失，可近似地按定常流动时的h_v计算；

$\frac{1}{g}\int_{l_1}^{l_2}\frac{\partial U}{\partial t}dl$——单位重力流体从断面 1 流到断面 2 时，克服惯性力作功所需要的能量，称为惯性水头或惯性阻力损失；

l——所取断面间的流管轴线长度。

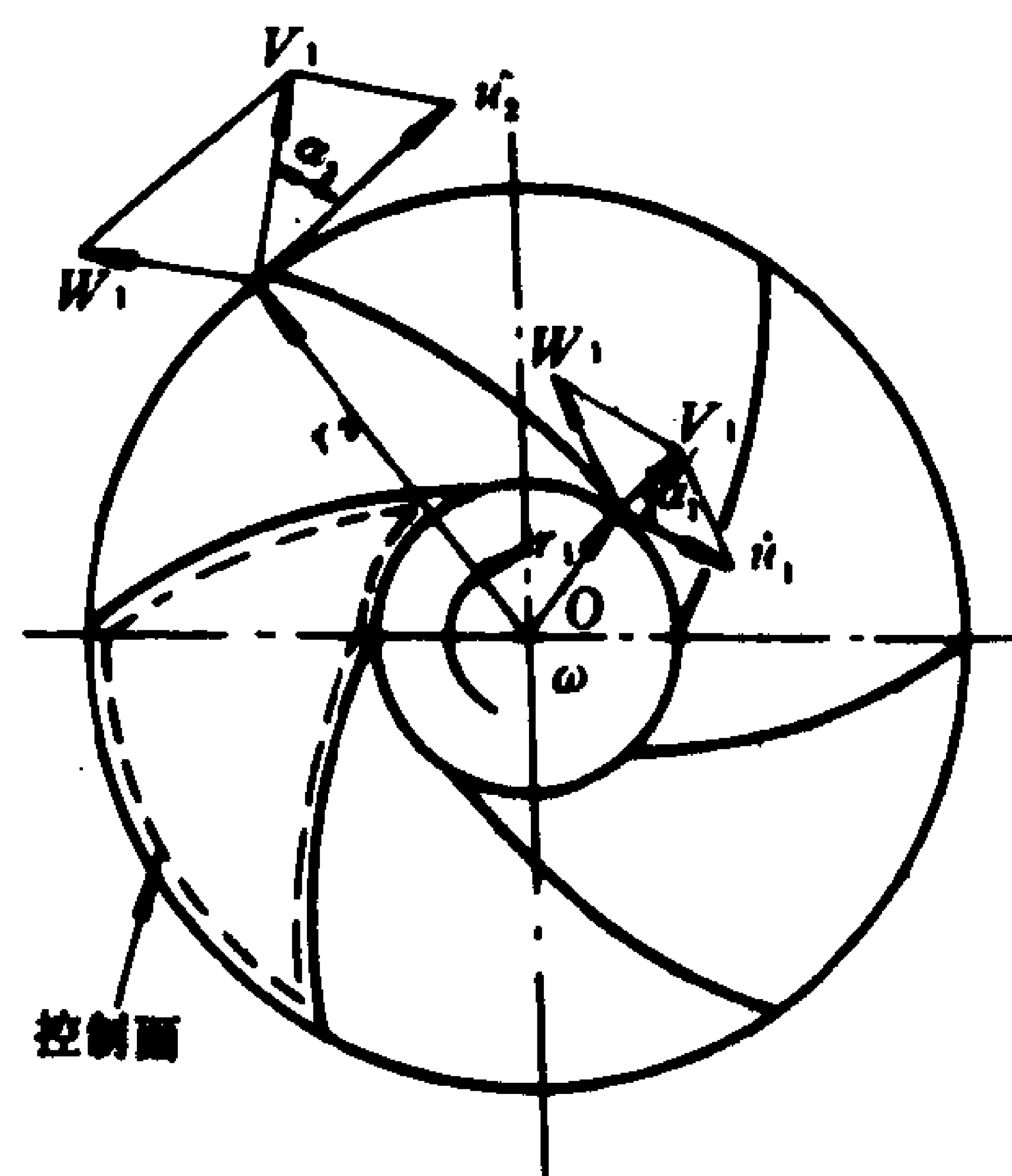


图 1.1.3-18 相对运动的伯努利方程用图

当流体的速度随时间而减小时，即当地加速度$\frac{\partial v}{\partial t}<0$，则惯性水头为负值，补偿了流体沿流程的机械能损失；反之，在机械能损失之上叠加了惯性水头，使剩余总能量减少更甚。

4.4 动量方程

动量方程是动量定理应用在运动流体的一种数学表达式. 对于一个确定的体系, 此定理可表述为: 在某瞬时, 体系的动量对时间的变化率等于该瞬时作用于该体系上的外力矢量和, 即

$$\frac{d}{dt}\int_{V}\vec{v}\,dm=\int_{V}\rho\,\vec{v}\,dv=\sum\vec{F} \tag{1.1.3-48}$$

式中: $\vec{v}$——流体体积 dv 的速度矢量, m/s。

对于确定的控制体 (图 1.1.3-19), 定常管流的动量方程可表述为: 作用在控制体内流体的全部外力应等于单位时间流出控制面的流体的动量减去流进控制面的流体的动量。它的投影式为

$$\left.\begin{aligned}Q_m(U_{2x}-U_{1x})&=\sum F_x\\Q_m(U_{2y}-U_{1y})&=\sum F_y\\Q_m(U_{2z}-U_{1z})&=\sum F_z\end{aligned}\right\} \tag{1.1.3-49}$$

式中: U_x, U_y, U_z——分别表示断面平均速度U在x、y、z轴上的分量;

$\sum F_x,\sum F_y,\sum F_z$——外力$\sum\vec{F}$在$x$、$y$、$z$轴上的分量。

作用在控制体内流体上的外力$\sum\vec{F}$, 包括控制体内流体的重力G, 作用在水断面A_1和A_2上的表面力 (表压力) $\overrightarrow{p_1A_1}$和$\overrightarrow{p_2A_2}$以及管壁作用在控制面A上的表面力$\vec{F_i}$(对于粘性流体$\vec{F_i}$包括切应力), 即

$$\sum\vec{F}=G+\overrightarrow{p_1A_1}\quad\overrightarrow{p_2A_2}+\vec{F_i}$$

由牛顿第三定律可得流体对管壁的作用力$\vec{F_d}$与管壁对流体的作用力$\vec{F_i}$大小相等方向相反, 即

$$\vec{F_d}=-\vec{F_i}$$

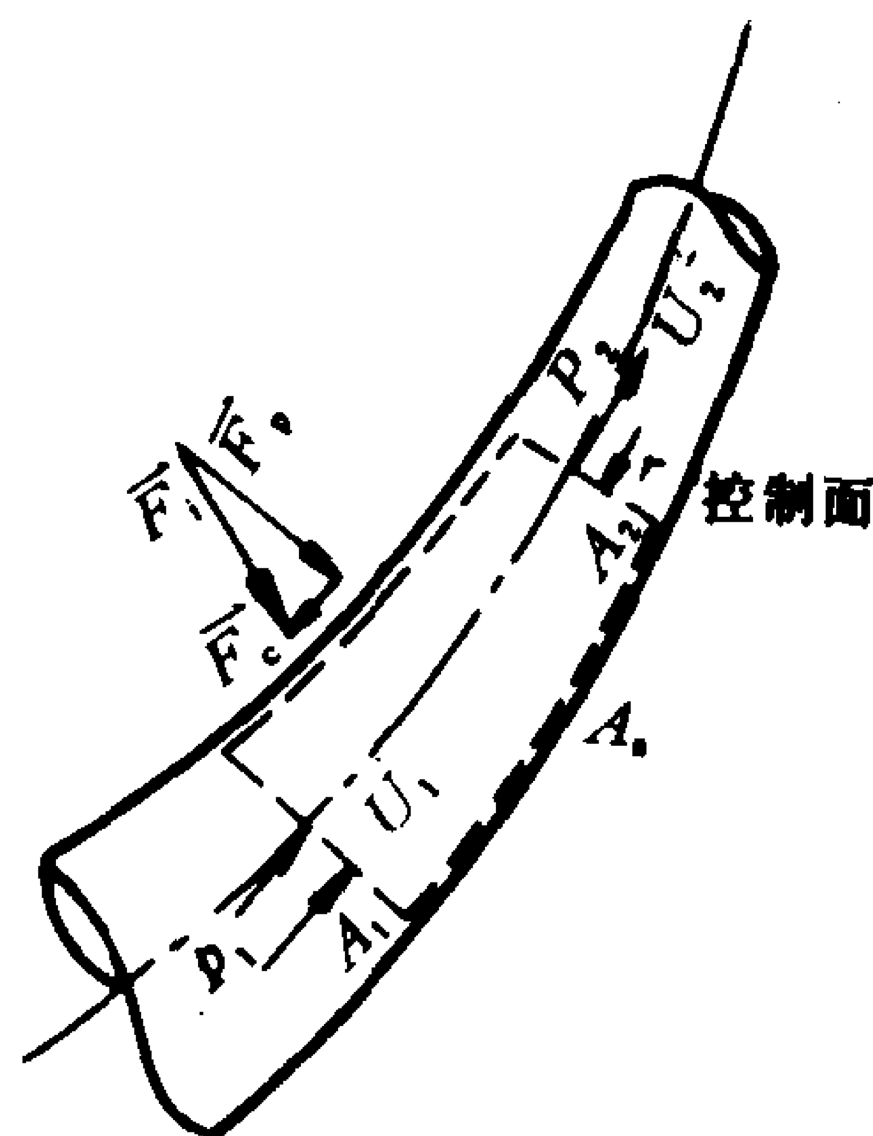


图 1.1.3-19 定常管流动量方程

4.5 动量矩方程

动量矩方程是动量矩定律应用于运动流体的一种数学表达式。

4.5.1 定常管流动量矩方程

流体在管内作定常流动时, 作用在管内流体 (控制体) 上的外力合力矩, 等于单位时间内流出控制面的流体的动量矩减去流进控制面的流体的动量矩, 即

$$Q_m\ (\vec{U_2}\times r_2-\vec{U_1}\times r_1)\ =\sum M\quad \text{N·m} \tag{1.1.3-50}$$

式中: $\vec{r_1},\vec{r_2}$——分别表示任意选定点O至过水断面上的平均矢径, m;

$\vec{U_1}$, $\vec{U_2}$——分别表示进、出口断面上的平均速度, m/s。

4.5.2 相对定常管流的动量矩方程

设流体在图 1.1.3-18 所示的叶轮流道内, 相对于随同叶轮作等速旋转的坐标系作定常流动。

1)流体作用在整个叶轮上的合力矩

$$M_d = -Q_m(U_2 r_2 \cos\alpha_2 - U_1 r_1 \cos\alpha_1) \quad N\cdot m \tag{1.1.3-51}$$

式中：　Q_m——通过叶轮中所有叶片流道的总质量流量，kg/s；

r_1，r_2——分别表示流道进、出口断面的半径，m；

U_1，U_2——分别表示流道进、出口断面的平均绝对速度，m/s；

α_1、α_2——分别为进、出口绝对速度与圆周切面间的夹角。

式（1.1.3-51）中右侧的负为M_d的转向为顺时针。

2)离心泵的功率

设叶轮的角速度为ω，则单位时间内，叶轮对流体所做的功，即泵的功率为

$$N = M_d\omega = Q_m (U_2 u_2 \cos\alpha_2 - U_1 u_1 \cos\alpha_1) \quad J/s \tag{1.1.3-52}$$

式中：u_1，u_2——分别为叶轮进、出口的圆周速度，m/s。

3）离心泵的理论扬程

离心泵供给单位重力流体的能量，称为泵的理论扬程，以H_p表示，单位为液柱高m。

$$H_p = \frac{M_d \cdot \omega}{g \cdot Q_m} = \frac{U_2 u_2 \cos\alpha_2 - U_1 u_1 \cos\alpha_1}{g} \tag{1.1.3-53}$$

4)欧拉涡轮方程

对于涡轮机，流体从叶轮外圈流入，从叶轮内圈流出，同样取进、出口断面半径分别为r_1、r_2，进、出口平均绝对速度分别为U_1，U_2，此时流体作用在叶轮上的力矩为

$$M = -M_d = -Q_m (U_1 r_1 \cos\alpha_1 - U_2 r_2 \cos\alpha_2) \quad N\cdot m \tag{1.1.3-54}$$

涡轮机的功率为

$$N = M\omega = Q_m (U_1 u_1 \cos\alpha_1 - U_2 u_2 \cos\alpha_2) \quad J/s \tag{1.1.3-55}$$

上式称为欧拉涡轮方程。

5　管流阻力

实际流体在管内流动时，在过流断面间能量的损失为管流阻力。不可压缩流体的管流阻力以过流断面间总水头损失h_s表示，它分为

1)沿程水头损失，是在管道水力直径基本不变的流程中，由流体的粘性造成流体与管壁之间的摩擦所产生的阻力，这个阻力沿整个流程都存在。在管流计算中，沿程水头损失以h_f表示。

2)局部水头损失，是流程中，在管道直径突然变化或设有局部装置处，由于流体的粘性和逆压梯度双重作用，造成涡旋而产生的阻力，这个阻力只在流程的局部地区存在。在管流计算中，局部水头损失以h_j表示。

5.1　水头损失计算公式

水头为单位重力流体的能量，具有长度因次。因此，从过流断面1到过流断面2之间的总水头损失为

$$h_s = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g}\right) \tag{1.1.3-56}$$

h_s为1、2过流断面间，各管段沿程水头损失h_{fi}与各局部水头损失h_{ji}之和，即

$$h_s = \sum_{i=1}^{m} h_{fi} + \sum_{i=1}^{n} h_{ji} \tag{1.1.3-57}$$

并且有

$$h_{fi}=\lambda_i\frac{l_i}{d_i}\frac{U_i^2}{2g} \tag{1.1.3-58}$$

$$h_{ji}=\zeta_i\frac{U_i^2}{2g} \tag{1.1.3-59}$$

式中：λ_i——i管段中，沿程阻力系数，参见表 1.1.3-26；

l_i——i管段的管长；

d_i——i管段的水力直径，参见表 1.1.3-16；

ζ_i——i处局部阻力系数，参见表 1.1.3-35，表 1.1.3-36；

U_i——平均流速，计算h_{fi}时应取l_i长管段内管流的平均流速，计算h_{ji}时应取定义ζ值的局部管流处的平均流速(通常是指局部损失后的过流断面的平均流速)。

5.2 沿程阻力系数

影响沿程阻力系数λ的因素有：流动是层流还是湍流；雷诺数R_e的大小；管壁内表面相对粗糙度$\frac{\Delta}{d}$及过流断面的形状等。对于某一确定的管段

$$\lambda=f\ (\mathrm{Re},\ \Delta/d,\ S) \tag{1.1.3-60}$$

式中：S——过流断面形状。

1)流动光滑管，粗糙管和完全粗糙管

(1)粘性底层 管流为湍流时，各流体层之间不仅有粘性切应力，还存在着湍流切应力，而紧靠管壁存在的一薄层中，流体只受粘性切应力的作用，称这一薄层为粘性底层，如图 1.1.3-20 所示，其厚度为

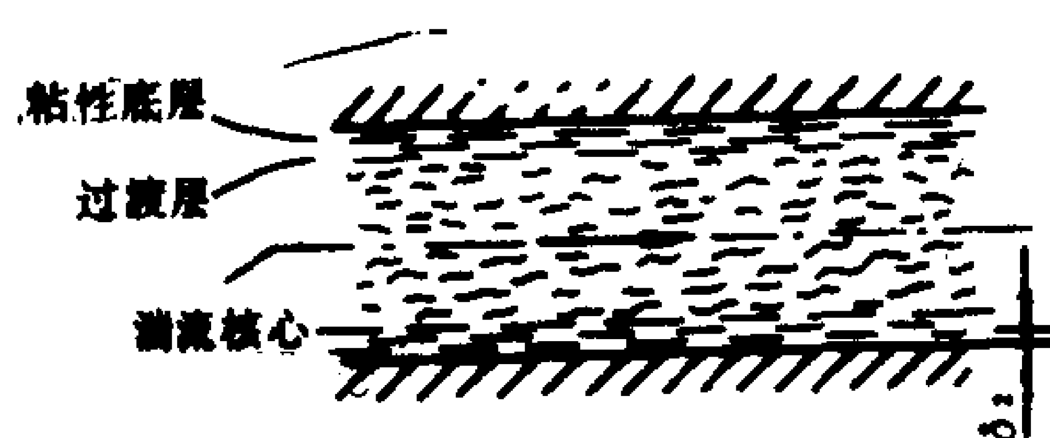


图 1.1.3-20 粘性底层

$$\delta_e=30\frac{d}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} \tag{1.1.3-61}$$

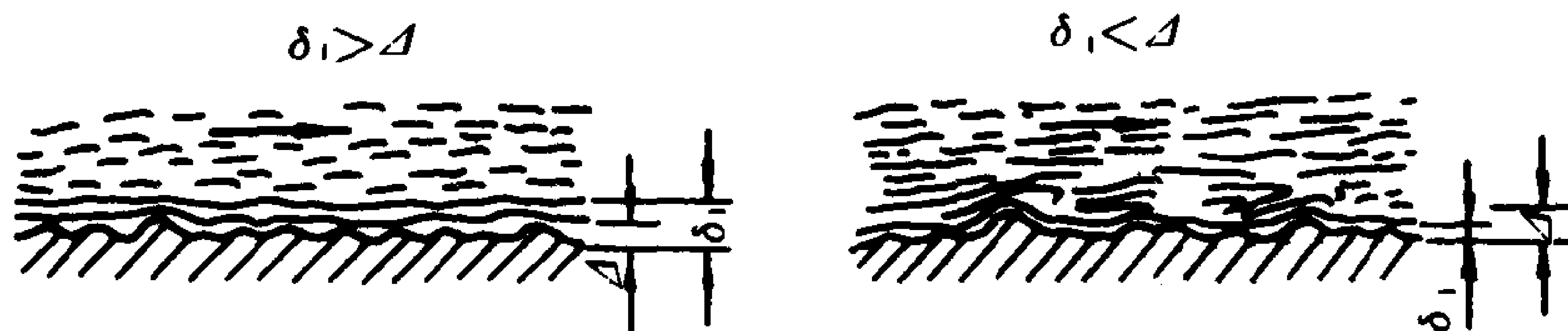


图 1.1.3-21 流动光滑管和流动粗糙管

式中：d——圆管内径；

λ——沿程阻力系数；

$\mathrm{Re}=\frac{Ud}{v}$——雷诺数。

(2)流动光滑管 粘性底层厚度δ_e大于管壁绝对粗糙高度Δ的管子称为流动光滑管，如图 1.1.3-21 a) 所示。λ仅与Re有关。

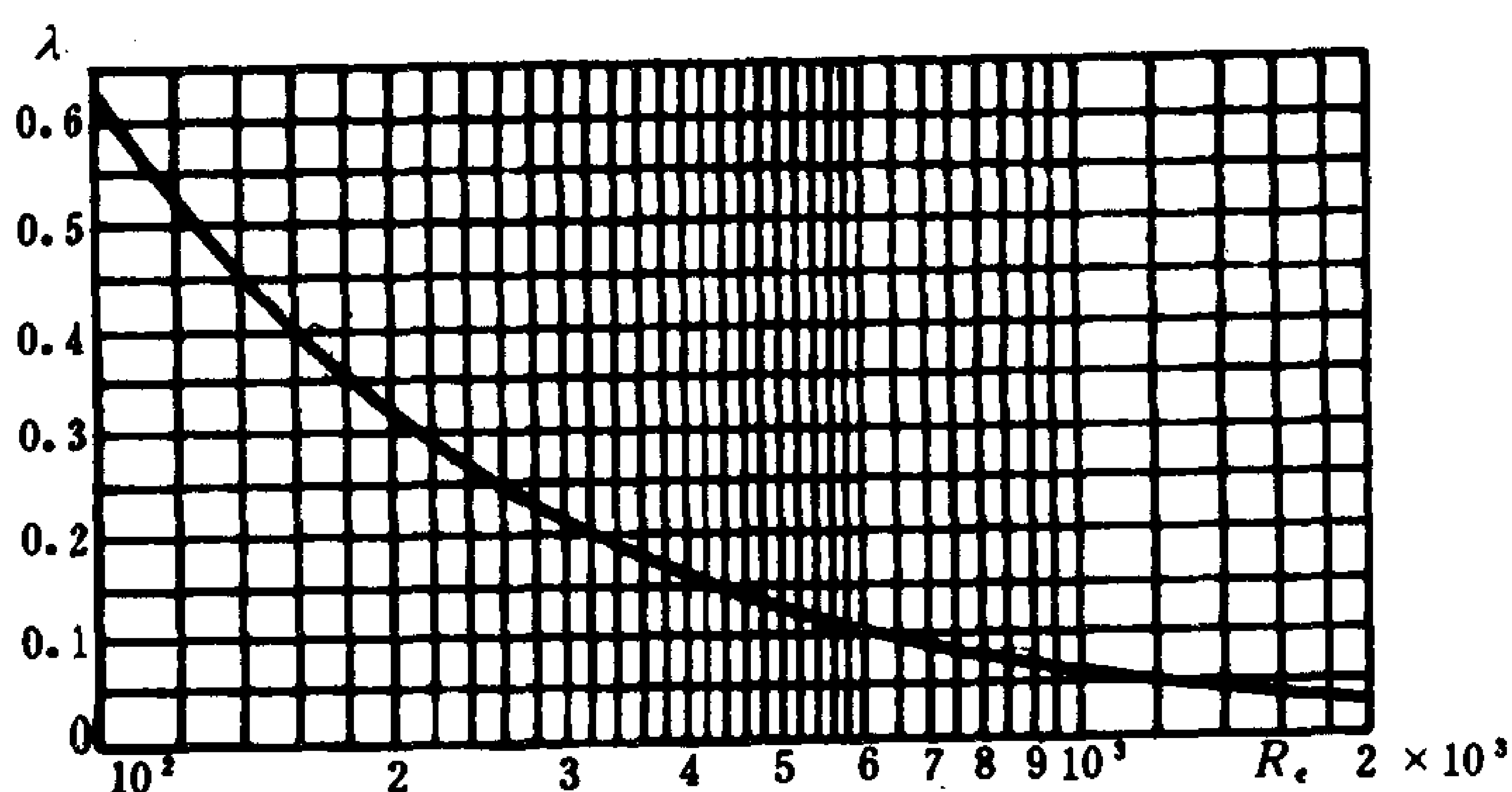


图 1.1.3-22 圆断面管流为层流λ—Re曲线

（3）流动粗糙管　粘性底层厚度δ_l小于管壁绝对粗糙高度Δ的管子称为流动粗糙管，如图1.1.3-21b）所示。λ与R_e和$\frac{\Delta}{d}$有关。

（4）流动完全粗糙管（阻力平方区）　粘性底层原度δ_l远小于管壁绝对粗糙高度Δ的管子，称为流动完全粗糙管。λ仅与$\frac{\Delta}{d}$有关。

2）圆断面管流的沿程阻力系数λ

可按表1.1.3-25中的公式计算，或由相应图中的曲线及表格查得。不同材料的管壁绝对粗糙高度Δ见表1.1.3-30。一般工业用钢管，沿程阻力系数λ与内径d的估算关系查表1.1.3-31（按管内流动达到完全粗糙考虑）。

表1.1.3-24　　**圆断面管流沿程阻力系数λ**

流动状态		雷诺数Re的范围		沿程阻力系数λ
层　流		Re<2000		$\lambda=\frac{64}{Re}$①，或查表1.1.3-25，图1.1.3-22
湍流	流动光滑管	$Re\leq15\frac{d}{\Delta}$	2000≤Re≤4000	查表1.1.3-27，图1.1.3-23曲线1
			$4000<Re<10^5$	$\lambda=\frac{0.3164}{Re^{0.25}}$，或查表1.1.3-26，图1.1.3-23曲线1
			Re>4000	$\lambda=\frac{1}{(1.8\lg Re-1.64)^2}$，或查表1.1.3-26，图1.1.3-23曲线2
	流动粗糙管	$15\frac{d}{\Delta}\leq Re\leq560\frac{d}{\Delta}$		$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}=-2\lg\left(\frac{\Delta}{3.7d}+\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right)$②在$\frac{\Delta}{d}=0.00008\sim0.0125$范围内：$\lambda\approx0.11\left(\frac{\Delta}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0.25}$或查表1.1.3-27，图1.1.3-24
	流动完全粗糙管（阻力平方区）	$Re>560\frac{d}{\Delta}$		$\lambda=\frac{1}{\left(2\lg\frac{3.7d}{\Delta}\right)^2}$，或查表1.1.3-28，图1.1.3-25

表1.1.3-25　　**圆断面管流为层流的λ值**

Re	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
λ	0.640	0.320	0.213	0.160	0.128	0.107	0.092	0.080	0.071	0.064
Re	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
λ	0.058	0.053	0.049	0.046	0.043	0.040	0.038	0.036	0.034	0.032

表1.1.3-26　　**圆断面管流为流动光滑管的λ值**

Re	2×10^3	2.5×10^3	3×10^3	4×10^3	5×10^3	6×10^3	8×10^3	10^4	1.5×10^4	
λ	0.032	0.034	0.040	0.040	0.038	0.036	0.033	0.032	0.028	
Re	2×10^4	3×10^4	4×10^4	5×10^4	6×10^4	8×10^4	10^5	1.5×10^5	2×10^5	3×10^5
λ	0.026	0.024	0.022	0.021	0.020	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015
Re	4×10^5	5×10^5	6×10^5	8×10^5	10^6	1.5×10^6	2×10^6	3×10^6	4×10^6	
λ	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010	0.010	
Re	5×10^6	8×10^6	10^7	1.5×10^7	2×10^7	3×10^7	6×10^7	8×10^7	10^8	
λ	0.009	0.009	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006	0.006	

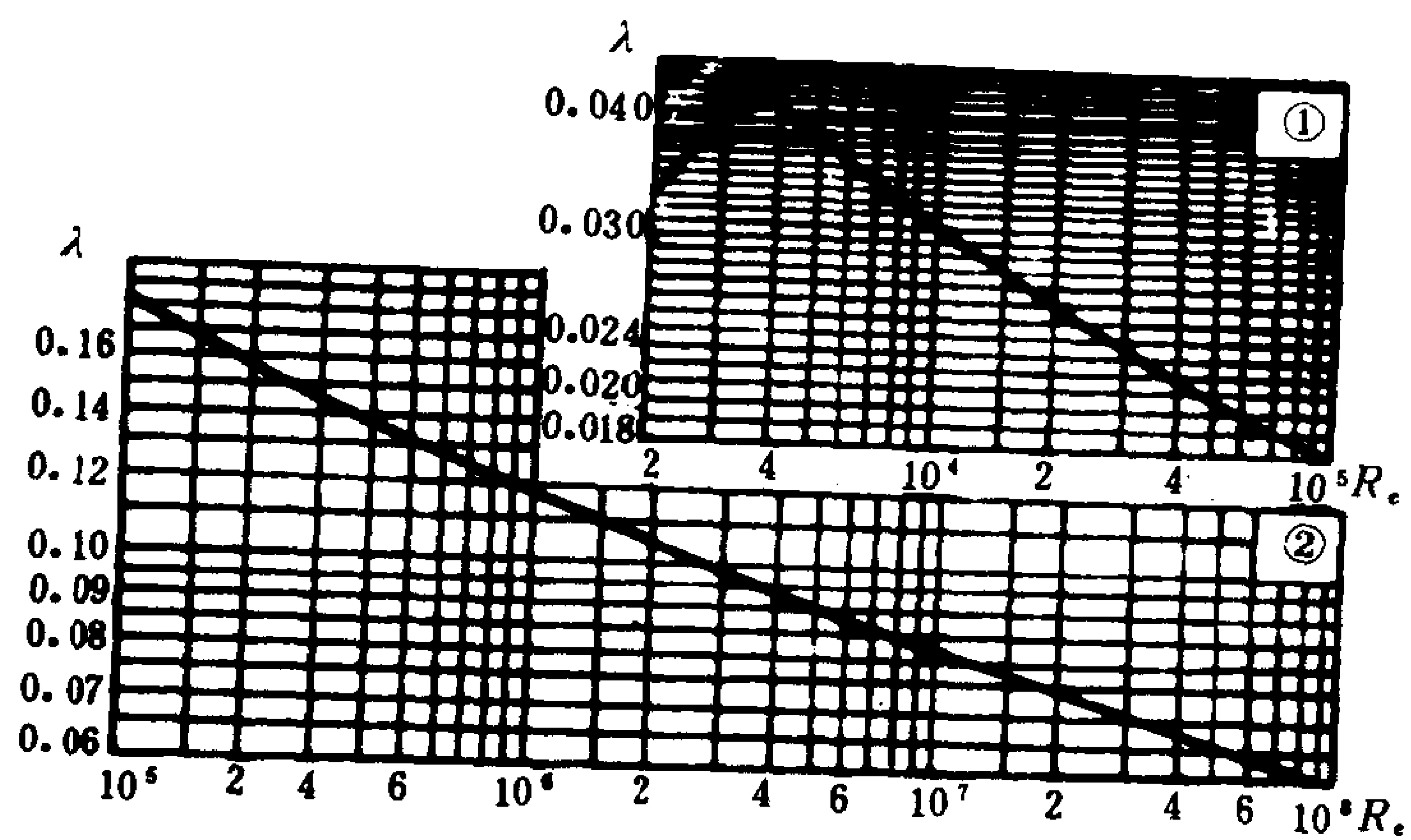


图 1.1.3-23　圆断面管流为流动光滑管的λ—Re曲线

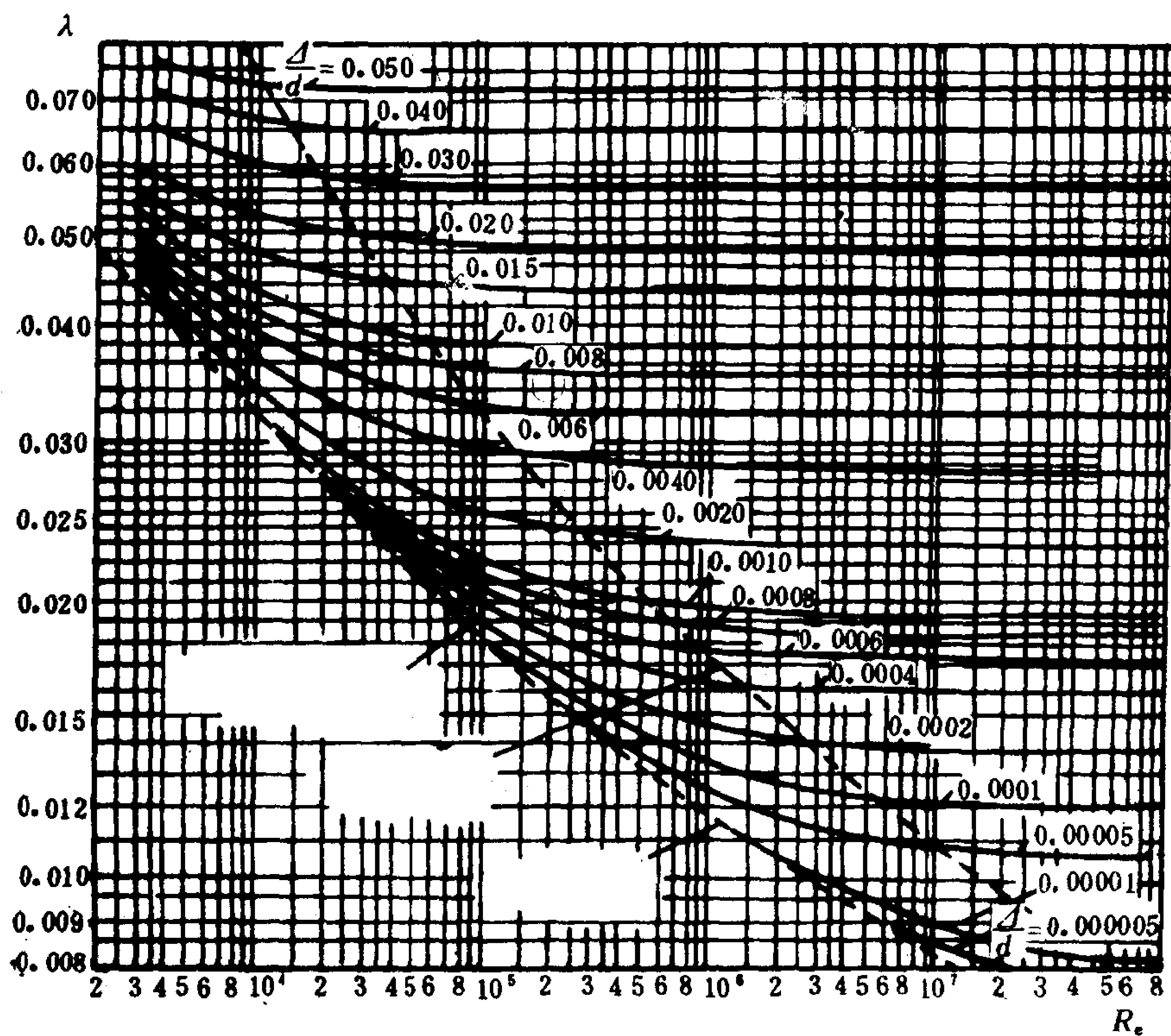


图 1.1.3-24　圆断面管流为流动粗糙管的λ—Re曲线

表 1.1.3-27　**圆断面管流为流动粗糙管的λ值**

$\bar{\Delta}=\frac{\Delta}{d}$ \ λ \ Re	3×10^3	4×10^3	6×10^3	10^4	2×10^4	4×10^4	6×10^4	10^5	2×10^5
0.05	0.077	0.076	0.074	0.073	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
0.04	0.072	0.071	0.068	0.067	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
0.03	0.065	0.064	0.062	0.061	0.059	0.057	0.057	0.057	0.057
0.02	0.059	0.057	0.054	0.052	0.051	0.050	0.049	0.049	0.049
0.015	0.055	0.053	0.050	0.048	0.046	0.045	0.044	0.044	0.044
0.010	0.052	0.049	0.046	0.043	0.041	0.040	0.039	0.038	0.038
0.008	0.050	0.047	0.044	0.041	0.038	0.037	0.036	0.035	0.035
0.006	0.049	0.046	0.042	0.039	0.036	0.034	0.033	0.033	0.32
0.004	0.048	0.044	0.040	0.036	0.033	0.031	0.030	0.030	0.028
0.002	0.045	0.042	0.038	0.034	0.030	0.027	0.026	0.026	0.024
0.001	0.044	0.042	0.037	0.032	0.028	0.025	0.024	0.023	0.021
0.0008	0.043	0.040	0.036	0.032	0.027	0.024	0.023	0.022	0.020
0.0006	0.040	0.040	0.036	0.032	0.027	0.023	0.022	0.021	0.018
0.0004	0.036	0.040	0.036	0.032	0.027	0.023	0.022	0.020	0.018
0.0002	0.036	0.040	0.036	0.032	0.027	0.022	0.021	0.019	0.017
0.0001	0.036	0.040	0.036	0.032	0.027	0.022	0.021	0.019	0.017
0.00005	0.036	0.040	0.036	0.032	0.027	0.022	0.021	0.019	0.016
0.00001	0.036	0.040	0.036	0.032	0.027	0.022	0.021	0.019	0.016
0.000005	0.036	0.040	0.036	0.032	0.027	0.022	0.021	0.019	0.016

$\bar{\Delta}=\frac{\Delta}{d}$ \ λ \ Re	4×10^5	6×10^5	10^6	2×10^6	4×10^6	6×10^6	10^7	2×10^7	$>10^8$
0.05	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
0.04	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
0.03	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057
0.02	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
0.015	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
0.010	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
0.008	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
0.006	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
0.004	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
0.002	0.024	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
0.001	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
0.0008	0.020	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
0.0006	0.018	0.018	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
0.0004	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
0.0002	0.016	0.015	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
0.0001	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
0.00005	0.014	0.013	0.013	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
0.00001	0.014	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009
0.000005	0.014	0.013	0.012	0.011	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008

表 1.1.3-28　　圆断面管流为阻力平方区的λ值

$\overline{\Delta}=\frac{\Delta}{d}$	0.00005	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008
λ	0.010	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.018
$\overline{\Delta}=\frac{\Delta}{d}$	0.0009	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008	0.010
λ	0.019	0.020	0.023	0.026	0.028	0.031	0.032	0.035	0.038
$\overline{\Delta}=\frac{\Delta}{d}$	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	
λ	0.044	0.049	0.053	0.057	0.061	0.065	0.068	0.072	

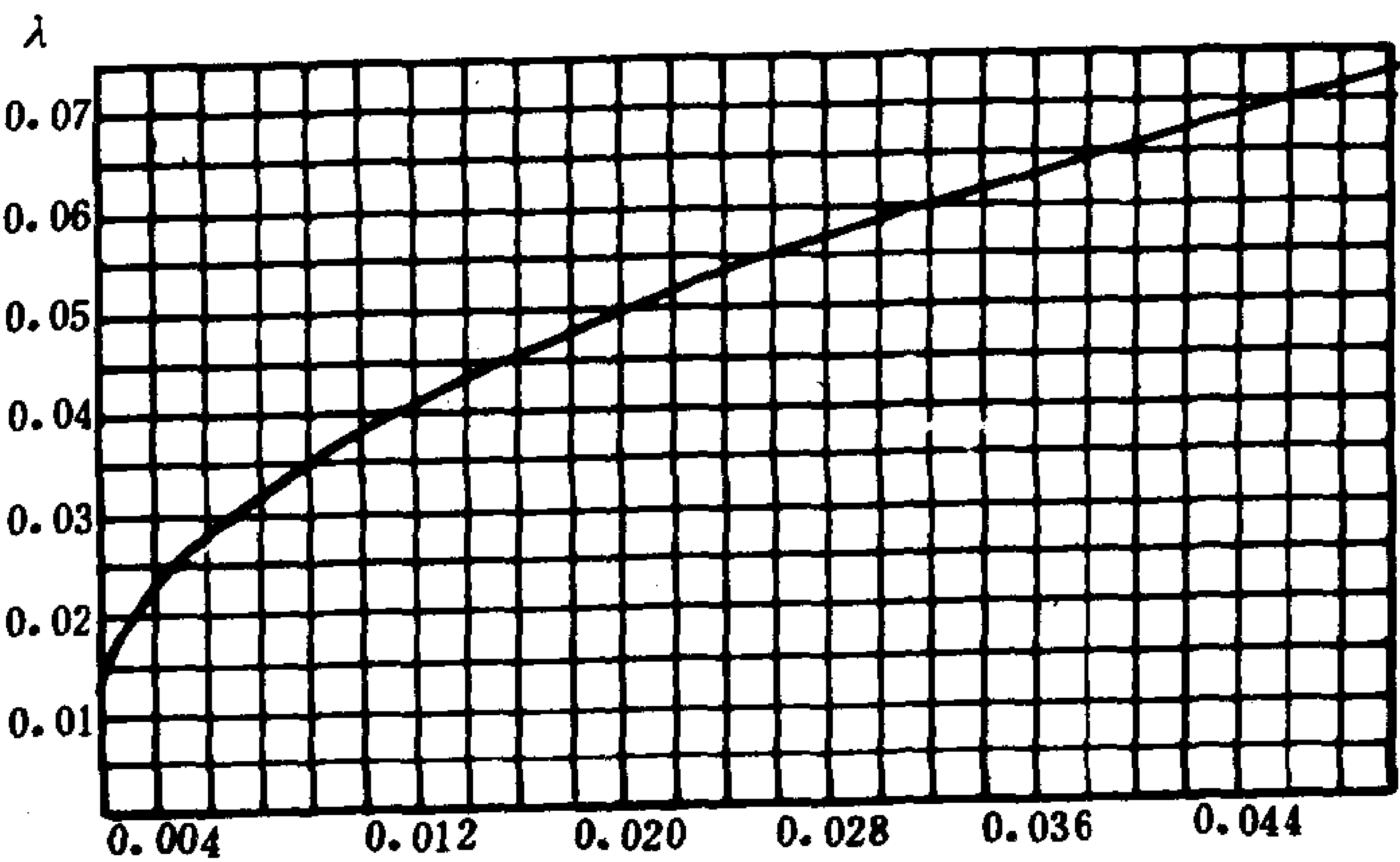


图 1.1.3-25　圆断面管流为阻力平方区的$\lambda-\Delta/d$曲线

表 1.1.3-29　　不同材料管壁绝对粗糙高度Δmm

材　料	管内壁表面状态	Δmm
钢	新的、冷拔无缝钢管	0.01～0.03
	新的、热拉无缝钢管	0.05～0.10
	新的、轧制无缝钢管	0.05～0.10
	新的、纵缝焊接钢管	0.05～0.10
	新的、螺旋焊接钢管	0.10
	轻微锈蚀的	0.10～0.20
	锈蚀的	0.20～0.30
	长硬皮的	0.50～2.0
	严重起皮的	>2
	有不均匀搭接接头的	≥5.0
	新的、涂沥青的	0.03～0.05
	一般的、涂沥青的	0.10～0.20
	精镀锌的新管	0.07～0.10
	普通镀锌	0.1～0.15
	镀锌钢板管	0.15～0.18

续上表

材料	管内壁表面状态	Δmm
铸铁	新的	0.25
	锈蚀的	1.0~1.5
	起皮的	1.5~3.0
	新的、涂沥青的	0.10~0.15
	有积垢的	1.0~1.5
	积垢相当多的	2.0~4.0
	受较强腐蚀的	<3.0
铜、黄铜、铝、塑料、玻璃	新的、光滑的	0.0015~0.01

表 1.1.3-30 **工业用钢管沿程阻力系数λ的估算值**

d(mm)	12.7	19.05	25.4	38.1	50.8	63.5
λ	0.028	0.0245	0.023	0.021	0.0195	0.018
d(mm)	76.2	101.6	127	203.2	254	457.2
λ	0.0175	0.0165	0.016	0.014	0.013	0.012

3）非圆断面管流的沿程阻力系数λ'

$$\lambda' = K_1\lambda \tag{1.1.3-62}$$

式中： λ——以非圆断面的水力直径为直径的圆管的沿程阻力系数，由表 1.1.3-26 求得；

K_1——形状系数，对于层流查表 1.1.3-32，对于湍流$K_1 \approx 1$。

表 1.1.3-31 **非圆断面管流的形状系数**

断面形状	形状系数 K_1							
矩形	h/b	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	K_1	1.5	1.34	1.20	1.02	0.94	0.90	0.89

（矩形断面图：高 h，宽 b）

对称圆环：

$$K_1 = \frac{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}{1+\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2+\frac{1-(d_2/d_1)^2}{\ln\frac{d_2}{d_1}}}$$

d_2/d_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
K_1	1.0	1.40	1.45	1.47	1.48	—	1.49	—	—	1.50

断面形状	形状系数 K_1
	(图：d_1、d_2 同心圆环断面)
椭圆形	见下表

b/a	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
K_1	1.21	1.16	1.11	1.08	1.05	1.03	1.02	1.01	1.01	1.0

4)管或杆组成的纵向管、杆间的沿程阻力系数λ''

$$\lambda''=K_2\lambda \tag{1.1.3-63}$$

式中：λ——以管、杆间断面的水力直径为直径的圆管的沿程阻力系数，由表 1.1.3-25 求得；

K_2——形状系数，查表 1.1.3-32。

表 1.1.3-32　**管或杆间的形状系数**

流道断面形状	形状系数 K_2
等边三角形自由布置(无套壳)	层流 ($R_e<2000$)；$1.0\leq s/d\leq1.5$ $K_2\approx0.89s/d+0.63$

s/d	1.0	1.05	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
K_2	1.52	1.56	1.61	1.70	1.79	1.88	1.97

湍流

当$s/d=1.0$　　$K_2=0.63$

当$0\leq s/d\leq1.5$　　$K_2\approx0.96\ s/d+0.63$

(图：纵轴 K_1：1.0、1.1、1.2；横轴 b/a：0、0.2、0.4、0.6、0.8)

流道断面形状	形状系数 K_2
矩形自由布置（无套壳）	

s/d	1.0	1.05	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
K_2	1.59	1.64	1.68	1.78	1.88	1.98	2.07

$$S=\frac{S_1+S_2}{2}$$

(图：纵轴：1.1、1.2、1.3、1.4；横轴 d_2/d_1：0、0.2、0.4、0.6、0.8)

5.3 局部阻力系数

影响局部阻力系数ζ的因素有：局部处的障碍形式F，Re，$\frac{\Delta}{d}$。即

$$\zeta=f\left(F, \mathrm{Re}, \frac{\Delta}{d}\right) \qquad (1.1.3\text{-}64)$$

1)管进口局部处的阻力系数ζ　可查表 1.1.3-33

表 1.1.3-33　**管进口局部阻力系数**

进口形式简图	局部阻力系数ζ											
等截面直管道	δ/d	b/d										
		0	0.002	0.005	0.010	0.020	0.050	0.100	0.200	0.300	0.500	∞
	0	0.50	0.57	0.63	0.68	0.73	0.80	0.86	0.92	0.97	1.00	1.00
	0.004	0.50	0.54	0.58	0.63	0.67	0.74	0.80	0.86	0.90	0.94	0.94
	0.008	0.50	0.53	0.55	0.58	0.62	0.68	0.74	0.81	0.85	0.88	0.88
	0.012	0.50	0.52	0.53	0.55	0.58	0.63	0.68	0.75	0.79	0.83	0.83
	0.016	0.50	0.51	0.51	0.53	0.55	0.58	0.64	0.70	0.74	0.77	0.77
	0.020	0.50	0.51	0.51	0.52	0.53	0.55	0.60	0.66	0.69	0.72	0.72
	0.024	0.50	0.50	0.50	0.51	0.52	0.53	0.58	0.62	0.65	0.68	0.68
	0.030	0.50	0.50	0.50	0.51	0.52	0.52	0.54	0.57	0.59	0.61	0.61
$d=\frac{4A}{x}$ 为水力直径	0.040	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.54	0.54
	0.050	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	∞	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
圆形导流管	导流管特征	r/d										
		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.16	≥0.20
无端壁	无端壁（未车光）	1.0	0.87	0.74	0.61	0.51	0.40	0.32	0.20	0.10	0.06	0.03
有端壁	无端壁（车光）	1.0	0.65	0.49	0.39	0.32	0.27	0.22	0.18	0.10	0.06	0.03
$d=\frac{4A}{x}$为水力直径	有端壁（未车光）	0.5	0.43	0.36	0.31	0.26	0.22	0.20	0.15	0.09	0.06	0.03

2)局部管段和设备的局部阻力系数ζ　可查表 1.1.3-34。

当$\mathrm{Re}>10^5$时，局部管段和设备的阻力系数ζ与Re无关，表 1.1.3-34 所列ζ值是按Re相当大的情况下计算的；除特别说明外，表中ζ值都是对损失后的平均流速而定的。

表 1.1.3-34 局部管段和设备的局部阻力系数ζ

名称和简图	局部阻力系数ζ

水泵进口

没有底阀	2～3								
有底阀	d mm	40	50	75	100	150	200	250	300
	ζ	12	10	8.5	7.0	6.0	5.2	4.4	3.7

收缩圆锥出口

Re＞2×10³时用直管内流速

$$\zeta=1.05\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4$$

$\frac{d_1}{d_2}$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
ζ	2.18	4.03	6.88	11.0	16.8	24.8	34.8	48.0	64.6	85.0

突然扩大

$$\zeta=\left(\frac{A_2}{A_1}-1\right)^2$$

$\frac{A_2}{A_1}$	10	9	8	7	6	5	4	3	2
ζ	81	64	49	36	25	16	9	4	1

突然缩小

$$\zeta=0.5\left(1-\frac{A_2}{A_1}\right)$$

$\frac{A_2}{A_1}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ζ	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

圆管弯头

$\zeta=K\zeta_{90^\circ}$　　Re＞10^5

θ°	20	30	40	50	60	70	80
K	0.40	0.55	0.65	0.75	0.83	0.88	0.95
θ°	90	100	120	140	160	180	—
K	1.0	1.05	1.13	1.20	1.27	1.33	—

$\frac{R}{d}$		1	2	4	6	10
ζ_{90°	光　滑	0.22	0.14	0.11	0.08	0.11
	粗　糙	0.52	0.28	0.23	0.18	0.20

名称和简图	局部阻力系数ζ
汇流三通 $A_1=A_2=A_3$	对于侧支管1：$h_{j1}=\zeta_1\frac{U_3^2}{2g}$　对于直支管2：$h_{j2}=\zeta_2\frac{U_3^2}{2g}$
分流三通 $A_1=A_2=A_3$	对于侧支管1：$h_{j1}=\zeta_1\frac{U_3^2}{2g_2}$　对于直支管2：$h_{j2}=\zeta_2\frac{U_3^2}{2g}$
光滑Ω形伸缩器	$\frac{R_1}{d}\approx6$;　$\frac{R_2}{d}\approx5$
滤　网	$Re=\frac{Ud}{v}\geq400$;　$\zeta=1.3\left(1-\frac{A_0}{A}\right)+\left(\frac{A}{A_0}-1\right)^2$
单层滤网 A——网全面积 A_0——通过面积 d——网丝直径 U——网前流速	$Re=\frac{Ud}{v}<400$；$\zeta=\eta\left[1.3\left(1-\frac{A_0}{A}\right)+\left(\frac{A}{A_0}-1\right)^2\right]$
n层滤网层距$>15d$	$\zeta=\sum_{i=1}^{n}\zeta_i$ ζ_i——第i层单层滤网的局部阻力系数

汇流三通：

分流三通：

光滑Ω形伸缩器：

$d$mm	50	100	150	200	250	300	400	500
ζ	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.4	2.6

滤网（$Re\geq400$）：

$\frac{A_0}{A}$	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
ζ	82	33.3	17	10	6.4	4.3	3.0	2.2	1.65
$\frac{A_0}{A}$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	—
ζ	1.26	0.97	0.75	0.58	0.44	0.32	0.23	0.14	—

滤网（$Re<400$）：

Re	50	100	150	200	300	400
η	1.44	1.24	1.13	1.08	1.03	1.00

名称和简图	局部阻力系数ζ

旋　塞

θ°	5	10	15	20	25	30	35
ζ	0.05	0.29	0.75	1.56	3.10	5.47	9.68
θ°	40	45	50	55	60	65	82
ζ	17.3	31.2	52.6	106	206	486	∞

插板式阀门

s/d	全开	$\frac{7}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{2}{8}$	$\frac{1}{8}$
ζ	0.00	0.07	0.26	0.81	2.06	5.52	17	97.8

分隔壁角度为45°全开状态标准截止阀

dmm	13	20	40	80	100	150	200	250	300	350
ζ	10.8	8.00	4.90	4.00	4.10	4.40	4.70	5.10	5.40	5.50

垂直分隔壁全开状态标准截止阀

dmm	13	20	25	30	40	50
ζ	15.9	10.5	9.30	8.60	7.60	6.90

全开状态的斜角阀门

沿a向阀座截面收缩30%时的ζ值

dmm	60	80	100	150	200	250	300	350
ζ	2.70	2.40	2.20	1.86	1.65	1.50	1.40	1.30

阀座截面不收缩时的ζ值

dmm	沿a向流动的ζ值	沿b向流动的ζ值
25.4	1.80	1.70
31.8	2.00	1.90
38.1	1.70	1.60

名称和简图	局部阻力系数ζ						
止回式和带滤网式的吸入阀 1 止回式吸入阀 2 带滤网的吸入阀	阀 门	$d$mm					
		40	70	100	200	300	500	750
	1.止回式ζ	1.3	1.4	1.5	1.9	2.1	2.5	2.9
	2.吸入式ζ	12	8.5	7.0	4.7	3.7	2.5	1.6

3)圆截面横向管束的阻力系数

圆截面横向管束阻力系数ζ值，根据不同的管束结构和几何尺寸的比例而定。为便于计算流体在一定平均流速下流经管束的阻力，常给出ζ值。管束的阻力，即以平均流速定义的压力水头损失表示为

$$\frac{\Delta p}{\rho_m g}=\zeta\frac{U_m^2}{2g}$$

$$\zeta=\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho_m U_m^2} \tag{1.1.3-65}$$

式中：Δp——流体流经管束的压力降；

g——重力加速度；

U_m——流体流经管束的平均流速；

$$U_m=\frac{1}{2}(U_1+U_2) \tag{1.1.3-66}$$

U_1——进入管束的平均流速；

U_2——流出管束的平均流速；

ρ_m——流体在平均温度t_m℃时的密度。

$$t_m=\frac{1}{2}(t_1+t_2) \tag{1.1.3-67}$$

t_1——流体进入管束的温度；

t_2——流体流出管束的温度。

（1）顺列管束（图 1.1.3-26）

①光滑顺列管束阻力系数

$$\zeta=\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_m^2}=k_1k_2\mathrm{Re}_m^{k_3}Z+\Delta\zeta_t \tag{1.1.3-68}$$

$$3\times10^3<\mathrm{Re}_m<10^5$$

式中：Re_m——平均雷诺数；

$$\mathrm{Re}_m=\frac{U_m d}{\upsilon_m}$$

U_m——按式 1.1.3-66 计算；

d——管束的单管直径；

υ_m——流体平均温度 t_m℃ 时的运动粘度；

Z——垂直于来流方向的顺列管束的横向排数，如图 1.1.3-26，$Z=4$；

$\Delta\zeta_t$——阻力系数的温度修正值；

$$\Delta\zeta_t=Z\frac{t_2-t_1}{273+t_m} \tag{1.1.3-69}$$

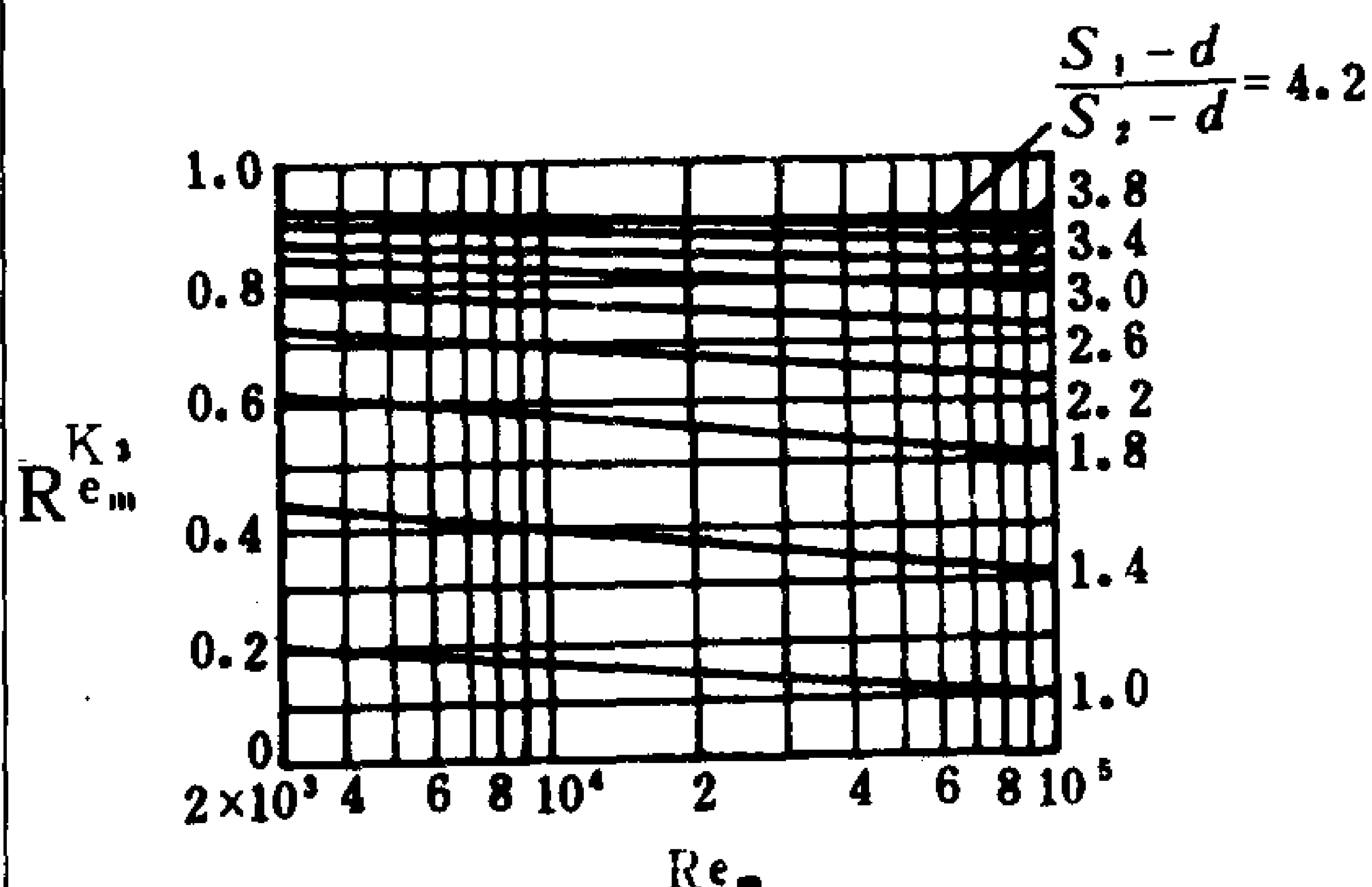
k_1——与管束倾斜角θ有关的系数，见表 1.1.3-36。

图 1.1.3-26 顺列管束

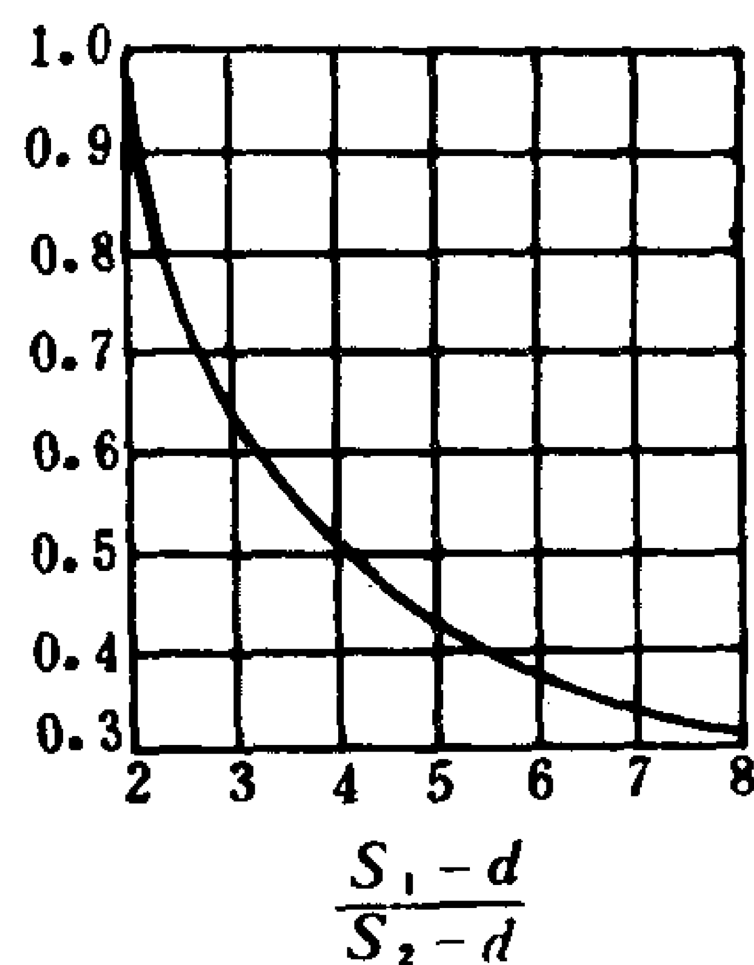
表 1.1.3-35 顺列管束的K_2，K_3，$\mathrm{Re}_m^{K_3}$

$\frac{s_1}{d}$	$\le\frac{s_2}{d}$	$>\frac{s_2}{d}$	
$\frac{s_1-d}{s_2-d}$	0.06～1.0	>（1.0～8.0）	>（8.0～15）
K_2	$2\left(\frac{s_1}{d}-1\right)^{-0.6}$	$0.38a\left(\frac{s_1}{d}-1\right)^{-0.5}$ 式中，$a=\left(\frac{s_1-d}{s_2-d}-0.94\right)^{-0.59}$ 或由图b直接查得	$0.118\left(\frac{s_1}{d}-1\right)^{-0.5}$
K_3	−0.2	$-0.2\left(\frac{s_1-d}{s_2-d}\right)^{-2}$	
$\mathrm{Re}_m^{K_3}$	由图a中$\frac{s_1-d}{s_2-d}=1$的线查得	由图a查得	

$\mathrm{Re}_m^{K_3}$和a的曲线图



a）$\mathrm{Re}_m^{k_3}$的曲线图



b）α的曲线图

②污浊顺列管束的阻力系数

$$\zeta_w\approx1.3\,\zeta \tag{1.1.3-70}$$

式中： ζ——光滑顺列管束的阻力系数。

（2）错列管束（图 1.1.3-27）

①光滑错列管束阻力系数

$$\zeta = K_1 K_2 \mathrm{Re}_m^{-0.27}\ (Z+1)\ + \Delta\zeta_t \qquad (1.1.3\text{-}71)$$

$$3\times10^3 < \mathrm{Re}_m < 10^5$$

式中： K_1——与倾斜角θ有关的系数，见表 1.1.3-36。

表 1.1.3-36 **顺列和错列管束的K_1值**

θ°	30	45	60	90
顺列	0.30	0.54	0.82	10
错列	0.34	0.57	0.80	1.0

K_2——与管径和管距有关的系数，见表 1.1.3-37；

$\mathrm{Re}_m^{-0.27}$——见图 1.1.3-28。

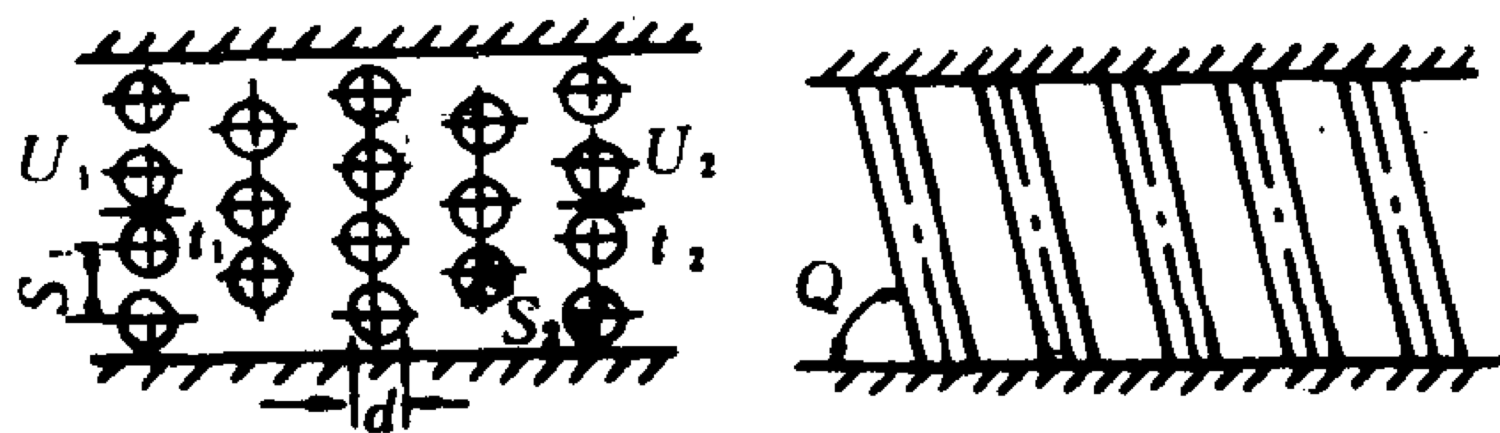


图 1.1.3-27 错列管束

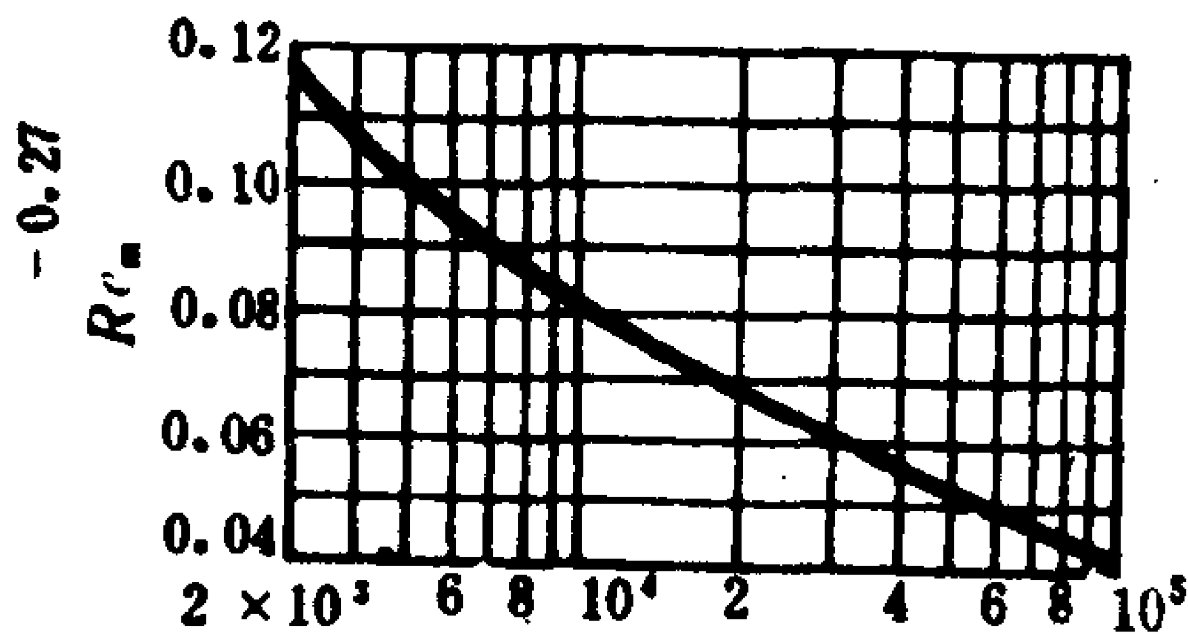
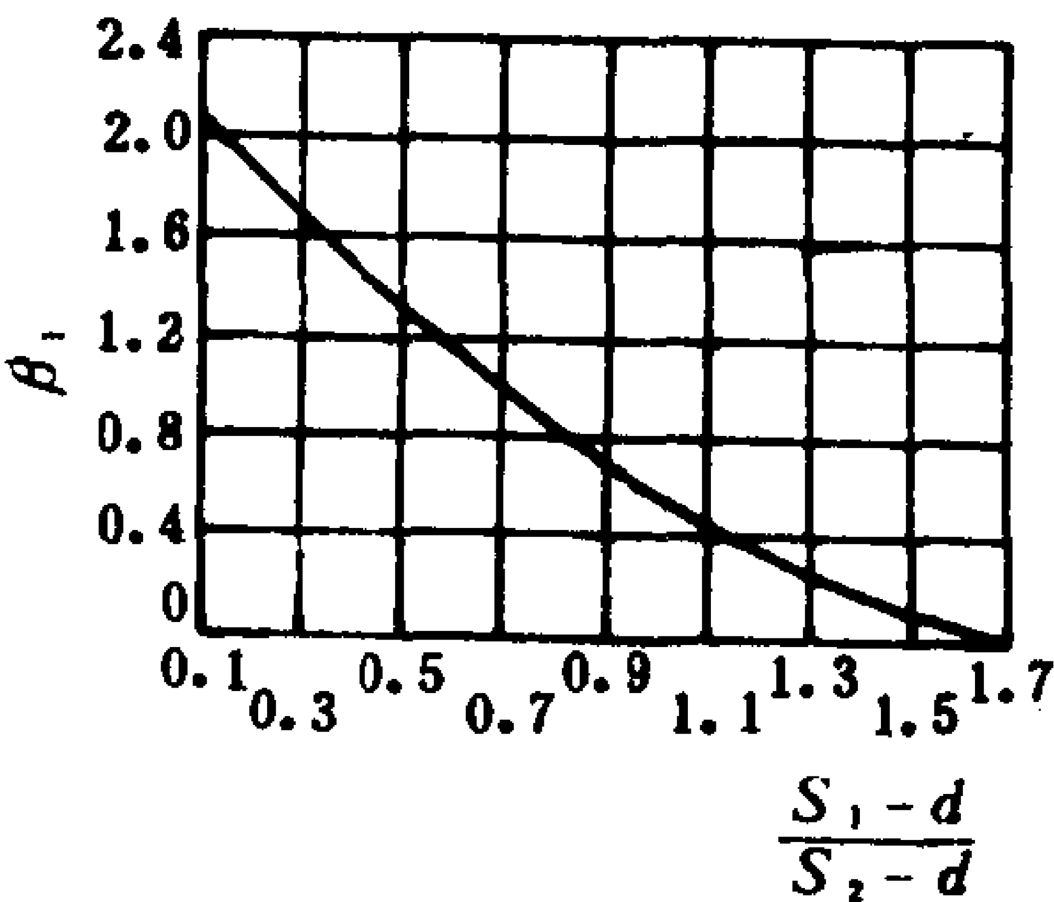
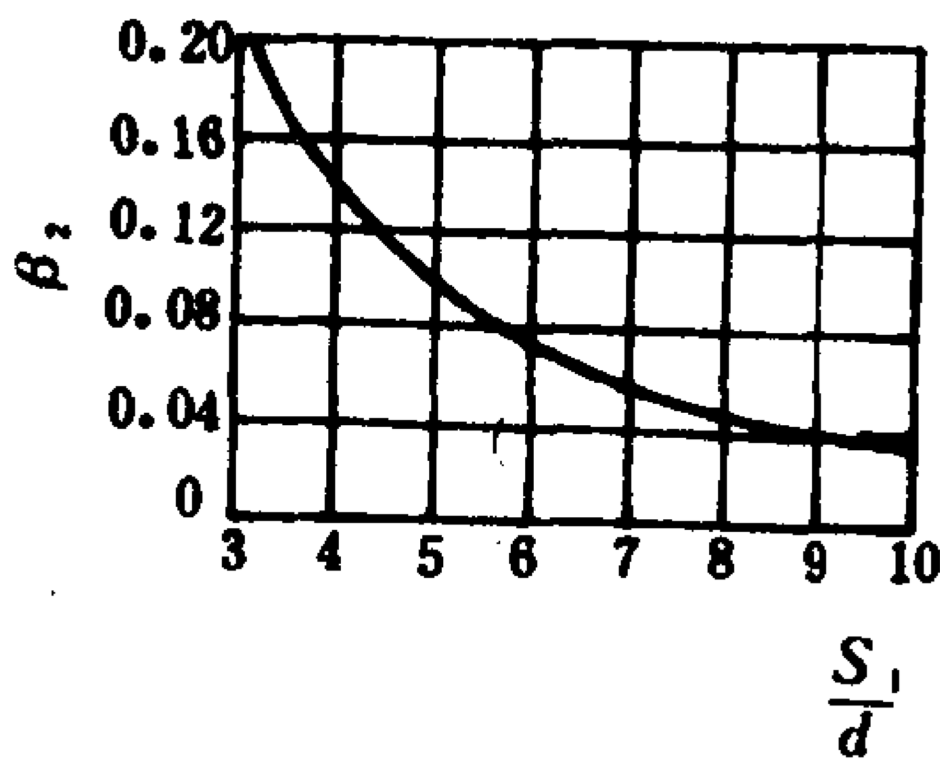


图 1.1.3-28 错列管束的$\mathrm{R_{em}^{-0.27}}$与$\mathrm{R_{em}}$关系曲线

表 1.1.3-37 **错列管束的K_2值**

$\frac{s_1}{d}$	<1.44		≥1.44	1.44~3	>（3~10）
$\frac{s_1-d}{s_2'-d}$	0.1~1.7	1.7~6.5	>(0.1~<1.7)	1.7~6.5	>1.7
K_2	$3.2+0.66\beta_1+\frac{1.44-\frac{s_1}{d}}{0.11}(0.8+0.2\beta_1)$ 式中，$\beta_1=\left(1.7-\frac{s_1-d}{s_2-d}\right)^{1.5}$或由图$a$直接查得	$\left(1.88-\frac{s_1}{d}\right)\times\left(\frac{s_1-d}{s_2'-d}+1\right)^2$	$3.2+0.66\beta_1$式中，$\beta_1=\left(1.7-\frac{s_1-d}{s_2'-d}\right)^{1.5}$ 或由图a直接查得	$0.44\left(\frac{s_1-d}{s_2'-d}+1\right)^2$	$1.83\beta_2$式中，$\beta_2=\left(\frac{s_1}{d}\right)^{-1.46}$ 或由图b直接查得
β_1和β_2的曲线图	 a）β_1的曲线图			 b）β_2的曲线图	

$\Delta\zeta_t$——阻力系数的温度修正值，同式 1.1.3-69。

②污浊错列管束的阻力系数为

$$\zeta_w \approx 1.3\zeta \tag{1.1.3-72}$$

式中：ζ——光滑错列管束的阻力系数。

5.4 管路计算

管路计算中，若局部水头损失和速度头之和，与沿程水头损失相比，小到可以略去不计时，称为长管；反之，为短管。

1）一般管路计算中的几类问题

（1）已知流量Q，确定管径d。

（2）已知流量Q，管长l，管径d和管路布置，确定由管路的始端（入口端，以下标 1 表示），流到管路的终端（出口端，以下标 2 表示），所需要的总水头H。或总水头损失（总压降ΔP_0）

（3）已知总水头H。或允许的总压降Δp_0，管长l，管径d和管路布置，确定可以通过的流量Q。

（4）已知流量Q，总水头H_0或允许的总压降Δp_0，管路布置和管长l，确定管径d。

这四类问题中，（1）与（2）都是直接计算的问题，（3）中流速U未知，而在计算沿程阻力系数λ时，除阻力平方区外，都要求知道流速U，这时，可用叠代法逐步逼近求解。一种叠代方法是先按已知管径d的允许速度（见表 1.1.3-39）选取一个流速值而算（查）得λ，再由$\frac{\Delta p_0}{\rho g}=\sum\lambda\frac{l}{d}\frac{U_2}{2g}+\sum\zeta\frac{U^2}{2g}$算得$U$。若算得的$U$值与假定的$U$值不符，可再以算得的$U$重复上述计算，直到最后两次算得的$U$值之差满足误差要求；另一种叠代方法是先按此管的阻力平方区的λ值算得U，再由此U值算λ，直至最后两次算得的U值之差满足误差要求。问题（4）中要确定管径d，必须计算阻力损失，而计算阻力损失却需要知道管径d，可同问题（3）那样用叠代法逐步逼近。

（5）管路中有泵或风机的装置。除上述计算内容之外，尚须确定泵、风机的扬程或功率，称这种管路为泵联路。

2）允许速度

管内允许速度值是根据流体流动时没有水锤、不产生振动、经济及其它因素决定的，几种情况下的允许速度见表 1.1.3-38。

表 1.1.3-38 **几种情况下的允许速度U**

流体种类	应用场合	管道种类	允许流速 U m/s
	一般给水	主压力管道	2~3
		低压管道	0.5~1
水	工业用水	离心泵压力管	3~4
		离心泵吸水管 $d<250$	1~2
		离心泵吸水管 $d>250$	1.5~2.5
		往复泵压力管	1.5~2
		往复泵吸水管	≤1
		给水总管	1.5~3
		排水管	0.5~1.0

续上表

流体种类	应用场合	管道种类	允许流速 U m/s
水	冷却	冷水管 热水管	1.5~2.5 1~1.5
	凝结	凝结水泵吸水管 凝结水泵出水管 自流凝结水管	0.5~1 1~2 0.1~0.3
压缩空气	压气机	压气机进气管 压气机输气管	~10 ~20
	一般情况	$d \leqq 50$ $d \geqq 70$	≤8 ≤15
过热蒸气	锅炉、汽轮机	$d<100$ $d=100\sim200$ $d>200$	20~40 30~50 40~60
饱和蒸气	锅炉、汽轮机	$d<100$ $d=100\sim200$ $d>200$	15~30 25~35 30~40
矿物油	液压传动	吸油管道 压油管道（高压、较短） 短管 总回油管	1~2 2.5~5 ≤10 1.5~2.5

注：管径较小，压力较低或粘度较大时取较小的U。

3)各种管路的计算

不同管路计算时的伯诺里方程，以及流量、沿程水头损失h_f、局部水头损失h_j的计算见表1.1.3-39。

表1.1.3-39 **各种管路的计算**

管路种类	伯努利方程	流量	沿程水头损失h_f	局部水头损失h_j
等断面短管	$H_0=z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_2}{2g}$ $=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2}{2g}$ $+h_f+h_j$	$Q=\frac{\pi}{4}d^2U$	$h_f=\lambda\frac{l}{d}\frac{U^2}{2g}$ l——管全长	$h_j=\sum\zeta_i\frac{U^2}{2g}$ $\sum\zeta_i$——沿管路中各局部阻力系数之和
等断面长管（$l>1000d$）	$H_0=z_1+\frac{p_1}{\rho g}$ $=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+h_f$	$Q=\frac{\pi}{4}d^2U$	$h_f=\lambda\frac{l}{d}\frac{U}{2g}$ l——管全长	忽略不计
串联短管（直径不同的管子串联而成）	$H_0=z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}$ $=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2^2}{2g}$ $+h_f+h_j$	$Q=\frac{\pi}{4}d_1^2U$ $=\frac{\pi}{4}d_2^2U$ $=\frac{\pi}{4}d_i^2U_i$	$h_f=\sum\lambda_i\frac{l_i}{d_i}\frac{U_i^2}{2g}$ l_i, d_i, λ_i, U_i——各相应段的管长、管径、沿程阻力系数及平均速度	$h_j=\sum\zeta_i\frac{U_i^2}{2g}$ ζ_i, U_i——各相应处的局部阻力系数及平均速度

续上表

管路种类	伯努利方程	流量	沿程水头损失h_f	局部水头损失h_j
串联长管（直径不同的管子串联而成）	$H_0=z_1+\frac{p_1}{\rho g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+h_f$	$Q=\frac{\pi}{4}d_1^2U_1=\frac{\pi}{4}d_2^2U_2=\frac{\pi}{4}d_i^2U_i$	$h_f=\sum\lambda_i\frac{l_i}{d_i}\cdot\frac{U_i^2}{2g}$ l_i、d_i、λ_i、U_i 各相应段的管长、管径、沿程阻力系数及平均速度	忽略不计
并联短管分支管路 $j=1\sim n$ $n\geq2$	$H_0=z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2^2}{2g}+h_f+h_j$	$Q=\frac{\pi}{4}d_1^2U_1=\frac{\pi}{4}d_2^2U_2=\frac{\pi}{4}(\sum d_j^2U_j)$ d_j、U_j 各分支管路直径及速度	$h_f=\sum\lambda_i\frac{l_i}{d_i}\frac{U_i^2}{2g}$ l_i、d_i、λ_i、U_i 某一分支j管路中各相应段的管长、管径、沿程阻力系数及平均速度	$h_j=\sum\zeta_i\frac{U_i^2}{2g}$ 某一分支j管路中各相应处的局部阻力系数及平均速度
并联长管分支管路 $j=1\sim n$ $n\geq2$	$H_0=z_1+\frac{p_1}{\rho g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+h_f+h_j$	$Q=\frac{\pi}{4}d_1^2U=\frac{\pi}{4}d_2^2U=\frac{\pi}{4}(\sum d_j^2U_j)$	$h_f=\sum\lambda_i\frac{l_i}{d_i}\frac{U_i^2}{2g}$ l_i、d_i、λ_i、U_i 某一分支j管路中各相应段的管长、管径、沿程阻力系数及平均速度	忽略不计
分支管路节点为j	沿最长管路列伯努利方程	节点j的流入流量Q_{gj}等于流出流量Q_{cj} $Q_{gj}=Q_{cj}$	可沿最长分支管路分别计算h_f及h_j	
泵联路（H：泵或风机的扬程）	$H_0=H+z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{U_2^2}{2g}+h_f+h_j$	不同类别的管路可分别按本表进行计算		

6 绕流阻力

6.1 产生绕流阻力的原因

流体作用在被绕流的物体上，与物体运动方向相反的力，称为绕流阻力。其产生的原因有：

1)由于流体的粘性所引起的摩擦阻力；

2)由于非流线型物体边界层的分离，形成旋涡而引起的压差阻力；

3)由于存在自由液面而产生波浪所引起的兴波阻力；

4)由于被绕流物体垂直于来流方向有限长，而产生下洗流所引起的诱导阻力；

5)由于流体做非定常运动，或物体在流体中做加速度运动，所引起的惯性阻力；

6)对于高速气体流动，还存在由于激波而引起的激波阻力。

通常，绕流物体的阻力用阻力系数C_D表示

$$C_D=\frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_t} \tag{1.1.3-73}$$

式中： D——绕流物体的阻力；

V_∞——来流速度，或物体运动速度；

A_t——物体在垂直来流V_∞方向上的最大投影面积（迎流面积）。

本节以下介绍的C_D计算公式及C_D值都是采用迎流面积来定义的。

6.2 介绍几种物体的阻力系数

1)无限长圆柱体的阻力系数

(1)雷诺数$Re=\frac{V_\infty d}{\nu}<0.5$时的阻力系数$C_D$为

$$C_D=\frac{8\pi}{Re\ (2.002-\ln Re)} \tag{1.1.3-74}$$

(2)不同雷诺数时的阻力系数见图1.1.3-29。当$Re=(1.8\sim5)\times10^5$时，C_D急剧下降；当$Re>10^6$时，C_D却趋向增大。

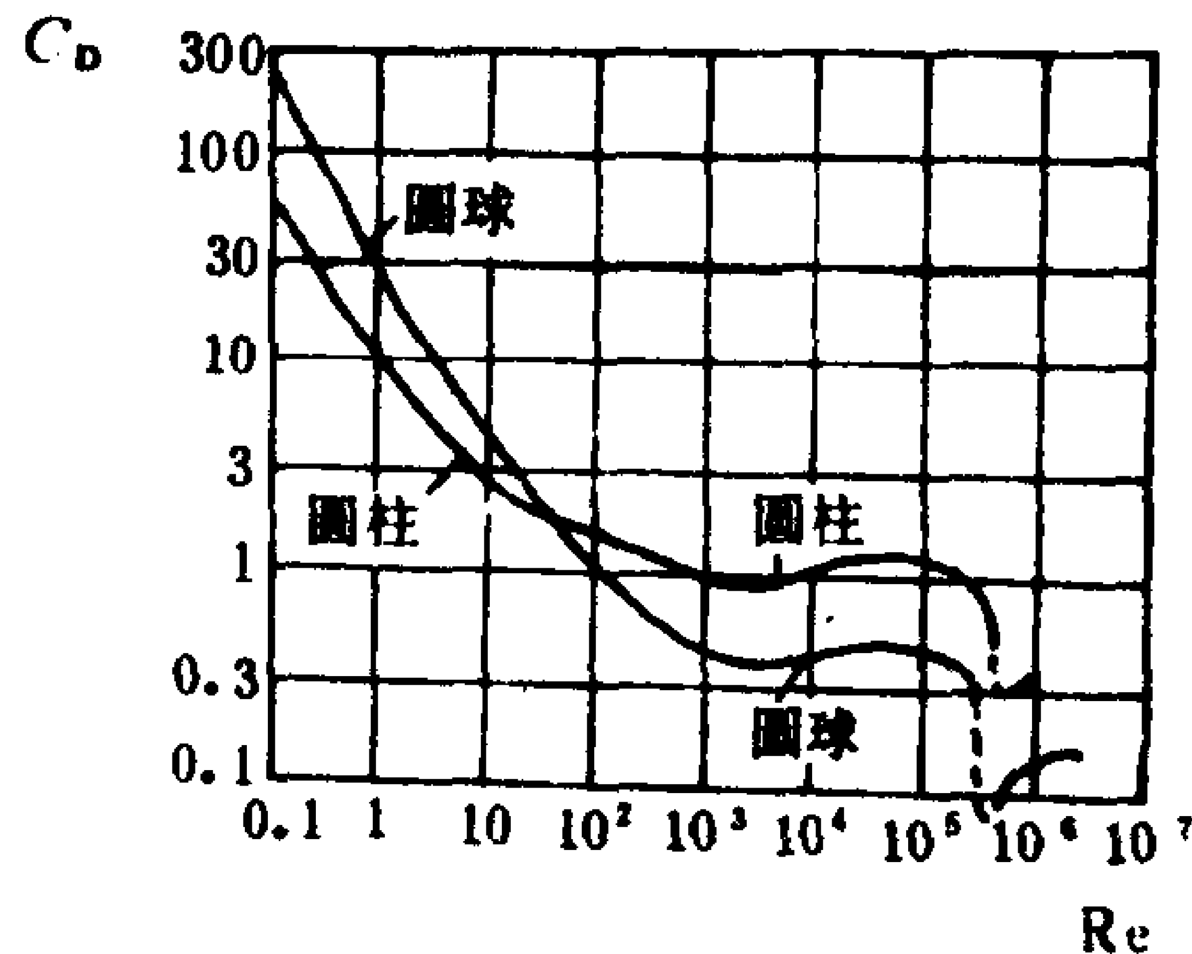


图1.1.3-29 无限长圆柱与圆球的阻力系数随雷诺数的变化曲线

2)圆球的阻力系数

(1)雷诺数$Re=\frac{V_\infty d}{\nu}<1$时的阻力系数$C_D$为

$$C_D=\frac{24}{Re}\left(1+\frac{3}{16}Re\right) \tag{1.1.3-75}$$

(2)不同雷诺数时的阻力系数见图1.1.3-28。同圆柱相类似，当$Re=3.5\times10^5$时，圆球的C_D急剧下降；当$Re\geq2\times10^6$时，C_D却趋向增大。

3)其他物体的阻力系数

(1)无限长柱体的阻力系数见表1.1.3-40。

表 1.1.3-40　　　　　　　　　　　　　几种无限长柱体的阻力系数

柱体断面形状	说　明	雷诺数Re	阻力系数C_D
	$\frac{h}{b}=0.033$	$\frac{V_\infty b}{\nu}=5\times10^5$ 2×10^4	0.78 0.66
	$\frac{h}{b}=0.055$ 0.125 0.197 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{3}$	$\frac{V_\infty b}{\nu}\approx10^6$ 10^6 10^6 10^5 10^5	0.193 0.096 0.080 0.2 0.1
		$10^4<\frac{V_\infty h}{\nu}<10^6$	1.16
		$10^4<\frac{V_\infty h}{\nu}<10^6$	1.93
		$10^4<\frac{V_\infty b}{\nu}<10^6$	2.05
	$\frac{h}{b}=2$ $\frac{1}{2}$	$2\times10^5\leq\frac{V_\infty h}{\nu}\leq8\times10^5$ $10^4\leq\frac{V_\infty h}{\nu}\leq5\times10^4$	1.6 0.6

（2）有限长物体的阻力系数见表 1.1.3-41。

表 1.1.3-41 几种有限长物体的阻力系数

绕流物体	说　明	雷诺数Re	阻力系数C_D
V_∞ → d	半球体	$10^4<\frac{V_\infty d}{\nu}<10^6$	0.42
V_∞ → d	半球体	$10^4<\frac{V_\infty d}{\nu}<10^6$	1.17
V_∞ → b	正方体	$10^4<\frac{V_\infty b}{\nu}<10^6$	1.05
V_∞ → θ d	$\theta=60^\circ$ $\theta=30^\circ$	$\frac{V_\infty d}{\nu}\approx 5$	0.51 0.34

7　缝隙流动、孔口出流和水锤

7.1　缝隙流动

缝隙流动通常是层流。几种缝隙流动的临界雷诺数见 1.1.3-14。

1)平行平板间的缝隙流动

平行平板间不同情况下的缝隙流动见表 1.1.3-42。

表 1.1.3-42 平行平板间的缝隙流动

缝隙状况	简图及速度分布	上、下板面上的摩擦应力τ_A，τ_B	通过板宽b的流量Q
上、下板固定，流体通过缝隙	a) y 1 A 2 U p_1 δ u p_2 x 1 B 2 l	$\tau_A=\tau_B=\frac{\delta\ (p_1-p_2)}{2l}$	$Q=\frac{\delta^3}{12\mu l}\ (p_1-p_2)$

缝隙状况	简图及速度分布	上、下板面上的摩擦应力τ_A，τ_B	通过板宽b的流量Q
上板沿x向以V等速运动，下板固定，缝内原充满静止流体	b)	$\tau_A=\tau_B=\mu\frac{V}{\delta}$	$Q=\frac{1}{2}V\delta$
上板沿x向以V等速运动，下板固定，流体通过缝隙	c)	$\tau_A=\mu\frac{V}{\delta}-\frac{(p_1-p_2)}{2l}\delta$ $\tau_B=\mu\frac{V}{\delta}+\frac{(p_1-p_2)}{2l}\delta$	$Q=\frac{\delta^3}{12\mu l}(p_1-p_2)+\frac{1}{2}V\delta$
上板反x向以V等速运动，下板固定，流体通过缝隙	d)	$\tau_A=\frac{(p_1-p_2)}{2l}\delta+\mu\frac{V}{\delta}$ $\tau_B=\frac{(p_1-p_2)}{2l}\delta-\mu\frac{V}{\delta}$	$Q=\frac{\delta^3}{12\mu l}(p_1-p_2)-\frac{1}{2}V\delta$

2)环形缝隙流动

(1)环缝管内的轴向缝隙流动见表1.1.3-43

表1.1.3-43　**环缝管内的轴向缝隙流动**

环缝简图	流量Q	压降Δp	说明
同心环缝 a)	$Q=\frac{\pi d_1\delta^3}{12\mu l}\Delta p$	$\Delta p=\frac{12\mu lQ}{\pi d_1\delta^3}$	l——环缝管的一段长 Δp——环缝管l段内的压降由摩擦而产生 $\delta=\frac{d_1-d_2}{2}$ e——偏心距 $\delta\ll d_1$ 管长远大于d_1
偏心环缝 b)	$Q=\frac{\pi d_1\delta^3}{12\mu l}(1+1.5\frac{e^2}{\delta^2})\Delta p$	$\Delta p=\frac{12\mu lQ}{\pi d_1\delta^3(1+1.5\frac{e^2}{\delta^2})}$	

续上表

环缝简图	流量Q	压降Δp	说明	
相切环缝 c)	$Q=\frac{5\pi d_1\delta^3}{24\mu l}\Delta p$	$\Delta p=\frac{4.8\mu lQ}{\pi d_1\delta^3}$	$\rho=\delta$	

（2）有限长度的同心环形缝隙及槽形缝隙内的轴向流动

轴向通过这种缝隙中的体积流量Q为

$$Q=\phi A\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{1.1.3-76}$$

式中：　A——缝隙过流断面面积；

Δp——流体在全段缝隙上的压力损失；

ϕ——流量系数，不同情况下ϕ值，见表 1.1.3-44。

表 1.1.3-44　　有限长度同心环形缝隙及槽形缝隙内轴向流动流量系数

缝隙简图	流量系数	应用条件
同心环形缝隙	$\phi=c\sqrt{\mathrm{Re}}$	$\frac{\delta}{d}<0.1$, $\frac{l}{\delta}>10$ $\mathrm{Re}=\frac{2\delta Q}{\nu A}<500$ A——过流断面面积
	$\phi=0.62\sim0.70$	$\frac{\delta}{d}<0.1$, $\frac{l}{\delta}=8\sim20$　$\mathrm{Re}>2000$
槽形缝隙	$\phi=0.05\sqrt{\mathrm{Re}}$	$l=(1.5\sim2)\ b$ $\mathrm{Re}=\frac{4Q}{\nu x}<1500$ x——湿周周长
	$\phi=0.3\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{8}}$	$l=(1.5\sim2)\ b$ $\mathrm{Re}=150\sim1500$
	$\phi=0.8\sim0.66$	$\mathrm{Re}>1500$ $\frac{A}{b^2}=0.35\sim0.8$

3）细长圆管内的层流流动见表 1.1.3-45

表 1.1.3-45　　细长圆管内的层流流动

简图	速度分布	流量	壁面上的摩擦应力
	$u=\frac{\Delta p}{4\mu l}(R^2-r^2)$	$Q=\frac{\pi\Delta p}{8\mu l}R^4$ Δp——长l管段内由摩擦而产生的压力降	$\tau=\frac{\Delta p}{2l}R$

7.2 孔口出流

孔口出流的流量、流量系数及出流特点，见表 1.1.3-46。

表 1.1.3-46　　**孔　口　出　流**

简　图	流　量	流量系数	出流特点
薄壁小孔口出流	$Q=4A_k\sqrt{2gH}$ $\left(A_1\gg A_k 或 \frac{U_1^2}{2g}\ll H;\ p_1=p_2=p_a\right)$ $A_k=\frac{\pi}{4}d_k^2$	$Re=\frac{\sqrt{2gH}}{\nu}d_k$	1）孔口断面上流体质点沿着彼此不平行的迹线而运动 2）出流的流束断面积，在孔口附近发生收缩
外伸圆柱形管咀	$Q=4A_k\sqrt{2gH}$ $\left(A_1\gg A_k 或 \frac{U_1^2}{2g}\ll H;\ p_1=p_2=p_a\right)$ $A_k=\frac{\pi}{4}d_k^2$	$Re=\frac{\sqrt{2gH}}{\nu}d_k\geq 10^5$时	1）最大出流量为薄壁小孔出流的 $\frac{4}{3}$ 倍左右 2）出流速度比薄壁小孔出流要小

7.3 水锤

7.3.1 水锤现象

在管流中，由于启动、停机、阀门突然启闭和突然换向等原因，使管内流速发生急剧变化，导致管内压力急剧改变的流动现象称为水锤（水击）。发生水锤时，管内压力变化值可能很大，并有较高的频率，以致管子可能爆裂。

水锤是非定常流动。水锤压力波以速度C_p沿管路来回传播，过程如下：

1）当阀门K（图 1.1.3-30 a）突然关闭时，原以U_0作定常流动的液体，首先在紧邻阀门的A处突然停止流动，压力突然由原来的p_0值升高了Δp，液体受到压缩。阀门左侧液体相继停止流动，其压力升高值Δp也就以速度C_p由A处向上流传播。直至$\frac{l}{C_p}$时刻，Δp传到管道入口处B。此时，管内全部液体停止流动而处于被压缩状态，全管压力升高了Δp。

2）到$\frac{l}{C_p}$时刻，由于B处右侧压力高于左侧，致使液体由管口反向流入水池，从而使B处液体的压缩状态解除，压力恢复到原来的值p_0。B处右侧液体相继流向水池而解除压缩状态。至$\frac{2l}{C_p}$时刻，全管压力为p_0。

3）到$\frac{2l}{C_p}$时刻，由于液流的惯性，使A处液体发生膨胀，从而压力恢复到p_0后继续下降Δp，并以速度C_p由A向上流传播，至$\frac{3l}{C_p}$时刻，全管处于膨胀低压状态。

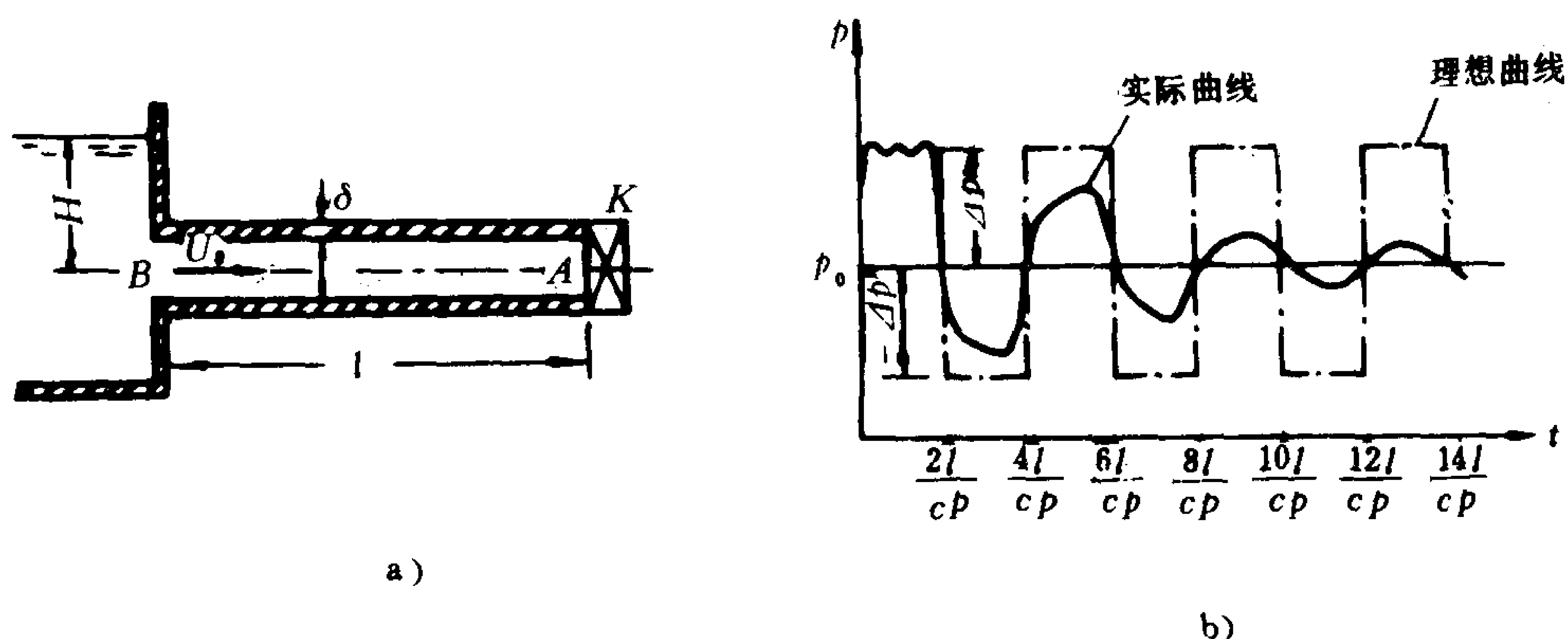


图 1.1.3-30　水锤

4）到$\frac{3l}{C_p}$时刻，由于B处左侧压力高于右侧，致使液体又由水池流入管道，B处液体的膨胀状态解除，压力升高而恢复到p_0。液体由水池沿管道相继解除膨胀状态。至$\frac{4l}{C_p}$时刻，A处液体再次被压缩，压力又升高，并且开始同 1）向上流传播。

以后，如上述反复进行，直至因阻力的作用而消失。图 1.1.3-30 b）为A处压力随时间的变化情况。

水锤压力Δp沿管长来回传播一次的时间$\frac{2l}{C_p}=t_c$称为水锤的相。

7.3.2　水锤压力波的传播速度

$$C_p=\frac{C}{\sqrt{1+B\frac{E}{E_g}}} \tag{1.1.3-77}$$

式中：　E——液体的体积弹性模量，见表 1.1.3-44；

E_g——管壁材料的纵向弹性模量，见表 1.1.3-47；

B——管壁影响系数，见表 1.1.3-48；

C——液体中的声速。

$$C=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

冷水在薄壁（$d_1/\delta>20$）钢管中发生水锤时，

$$C_p\approx\frac{1420}{\sqrt{1+\frac{d_1}{100\delta}}}\quad \text{m/s} \tag{1.1.3-78}$$

式中：　d_1——管壁内径；

δ——管壁厚度。

表 1.1.3-47　　**几种管壁材料纵向弹性模量E_g**　N/m²

管材	钢	铸铁	紫铜	黄铜	铝合金	混凝土	硬质氯乙烯
E_g	1962	1177.2	1177.2	981	706.3	196.2	19.62～39.24

表 1.1.3-48　　　　　　　　**几种管子的管壁影响系数B**

管壁情况	B	说　明
薄壁管（$\frac{d_1}{\delta}>20$）	$\frac{d_1}{\delta}$	d_1——管内径 d_2——管外径 δ——管壁厚度
厚壁管	$\frac{2(d_2^2+d_1^2)}{d_2^2-d_1^2}$	
圆筒（$\frac{d_2}{d_1}\gg 1$）	2	

7.3.3　水锤压力

发生水锤时的压力变化量Δp，称为水锤压力。Δp随时间而变化，工程上最感兴趣的是最大水锤压力Δp_{max}。$\Delta p_{max}>0$的为正水锤（如阀门突然关闭）；$\Delta p_{max}<0$的为负水锤（如阀门突然打开）。几种状况下的最大水锤压力见表 1.1.3-49。表中Δp_{max}值对阀门关闭和打开的情况都适用。

表 1.1.3-49　　　　　　**几种状况下的最大水锤压力Δp_{max}** N/m²

管壁状况	液体名称	最大水锤压力$\Delta p_{max}\times 10^{-4}$	说　明
薄壁管	水	$\approx\frac{142.2(U_0-U_1)}{\sqrt{1+\frac{Ed_1}{E_g\delta}}}$	U_0——发生水锤前管内平均流速 U_1——发生水锤后管内平均流速 d_1——管子内径 δ——管壁厚度 E——液体的体积弹性模量 E_g——管壁材料的纵向弹性模量
薄壁管	液压油	$\approx\frac{118.7(U_0-U_1)}{\sqrt{1+\frac{Ed_1}{E_g\delta}}}$	
薄壁钢管	水	$\approx 117.7(U_0-U_1)$	

7.3.4　防止或减弱水锤的措施

1)减慢阀门关闭（开启）的速度;

2)减短管路长度;

3)减小阀门关闭（开启）前管内流速;

4)附设各种装置，如安全阀、空气室、缓冲器、行程节流阀等。

水锤现象在工业上也可加以利用，如水锤泵、水锤压力造型等。

参 考 文 献

〔1〕机械工程手册 电机工程手册 编辑委员会:《机械工程手册》，机械工业出版社，1982 年

〔2〕山东工学院，东北电力学院合编:《工程流体力学》，电力工业出版社，1980 年

〔3〕华绍曾　杨学宁等编译:《实用流体阻力手册》，国防工业出版社，1985 年

〔4〕机械工程手册 电机工程手册 编辑委员会:《电机工程手册》，机械工业出版社，1982 年

第 4 章　工程热力学

工程热力学是研究热能和机械能相互转换的学科，其基本任务是研究热能转换为机械能的规律和条件，找出提高热能利用经济性的途径。

1 基本概念

1.1 热力系统

在热力分析中，将研究对象的物体或范围称为热力系统，或简称系统。与系统有相互作用的物体，称为外界。系统与外界的分界面称为边界。

1.2 热力系统的分类

常用的有：

闭口系——通过边界与外界无物质交换的系统。

开口系——通过边界与外界有物质交换的系统。

绝热系——通过边界与外界没有热交换的系统。

孤立系——通过边界与外界既无能量交换又无物质交换的系统。

1.3 可逆过程

系统进行了一个过程后，如能使系统沿着原过程相反的方向进行至初态时，外界也能同时恢复原状，则这样的过程称为可逆过程，否则称为不可逆过程。

1.4 热力循环

封闭的热力过程称为热力循环。工程上常见的是热机循环（正循环）和制冷循环（逆循环）两大类。

1.5 比内能u

1公斤质量工质所具有分子、原子热运动的动能与分子间相互作用的位能之和，称为比内能，是状态参数。

1.6 比焓h

1公斤质量工质的焓称为比焓，其定义式为

$$h=u+pv \tag{1.1.4-1}$$

焓表示物质流进或流出热力系时带入或带出的内能及推挤功之和，是状态参数。

1.7 比熵s

1公斤质量工质在可逆过程中的微小换热量 δq 与其温度T之比，称为状态参数比熵的

全微分，即

$$ds=\frac{\delta q}{T} \tag{1.1.4-2}$$

因而比熵 s 为

$$s=\int\frac{\delta q}{T}+s_0 \tag{1.1.4-3}$$

式中：s_0——熵常数，熵是系统不可用能的度量。

1.8 比㶲 e_x

1公斤质量工质从某状态可逆变化到给定的环境状态时，所能作出的最大有用功，称为比㶲。㶲是状态参数，它表明系统所能作出的最大有用功。

根据能量方程和熵方程，可以导出比㶲的数学表达式为：

稳定流动系统工质的比㶲（或叫焓㶲）为

$$e_x=(h-T_0S)-(h_0-T_0S_0) \tag{1.1.4-4}$$

或

$$e_x=(h-h_0)-T_0(S-S_0) \tag{1.1.4-5}$$

闭口系工质的比㶲(或叫内能㶲)为

$$e_x=(u-T_0s+p_0v)-(u_0-T_0s_0+p_0v_0) \tag{1.1.4-6}$$

或

$$e_x=(u-u_0)+p_0(v-v_0)-T_0(s-s_0) \tag{1.1.4-7}$$

热流比㶲

$$e_q=q(1-\frac{T_0}{T}) \tag{1.1.4-8}$$

式中：h——给定状态下工质比焓；

h_0——环境状态工质比焓；

u——给定状态下工质比内能；

u_0——环境状态工质比内能；

v——给定状态下工质比容；

v_0——环境状态工质比容；

s——给定状态下工质比熵；

s_0——环境状态工质比熵；

T——给定状态下工质的温度；

T_0——环境状态下工质的温度。

1.9 比热

单位物量的物质温度升高(或降低) 1度所吸收(或放出)的热量称为比热容，简称比热，即

$$C=\frac{\delta q}{\mathrm{dt}} \tag{1.1.4-9}$$

1.10 比热比 k

定压比热 C_p 与定容比热 C_v 之比称为比热比，或叫绝热指数，即

$$k=\frac{C_p}{C_v} \tag{1.1.4-10}$$

理想气体的定压比热与定容比热之间的关系为

$$C_p = C_V + R \tag{1.1.4-11}$$

或

$$\mu C_p - \mu C_V = R_m = 8.3143 \quad \text{kJ/(kmol·K)} \tag{1.1.4-12}$$

式(1.1.4-11)和(1.1.4-12)称迈耶方程。

式中：R——气体常数；

R_m——通用气体常数；

μ——气体的千摩尔质量。

2 热力学第一定律及其应用

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力系统中的应用。它确定热力过程中各种能量的量之间的相互关系。对热能和机械能相互转换时有

$$Q = W \tag{1.1.4-13}$$

式中：Q——外界与系统间交换的热量，kJ。系统吸热时，Q为正值，反之为负；

W——外界与系统间交换的功量，kJ。系统对外作功时，W为正值，反之为负。

因此，热力学第一定律可表述为：第一类永动机(不消耗能量的热机)是不能创造成功的。

2.1 闭口系的热力学第一定律表达式

根据能量守恒定律，闭口系的能量方程为

$$Q = \Delta U + W \tag{1.1.4-14}$$

式中：ΔU——系统内能的变化量，$\Delta U = U_2 - U_1$；

式(1.1.4-14)即为闭口系热力学第一定律的一般表达式。

对可逆过程，式(1.1.4-14)变为

$$Q = \Delta U + \int_1^2 p dV \tag{1.1.4-15}$$

式中：$W = \int_1^2 p dV$——系统在可逆过程中所作的膨胀功。

2.2 开口系的热力学第一定律表达式

图1.1.4-1为开口系统的示意图。对稳定流动的开口系统，其能量方程为

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + \frac{\dot m}{2}\Delta \overline{V}^2 + \dot m g \Delta Z \\ &\quad + \Delta(pV) + W_s \\ &= \Delta(U + pV) + \frac{\dot m}{2}\Delta \overline{V}^2 \\ &\quad + \dot m g \Delta Z + W_s \end{aligned}$$

令$H = U + pV$，则上式变为

$$Q = \Delta H + \frac{\dot m}{2}\Delta \overline{V}^2 + \dot m g \Delta Z + W_s \tag{1.1.4-16}$$

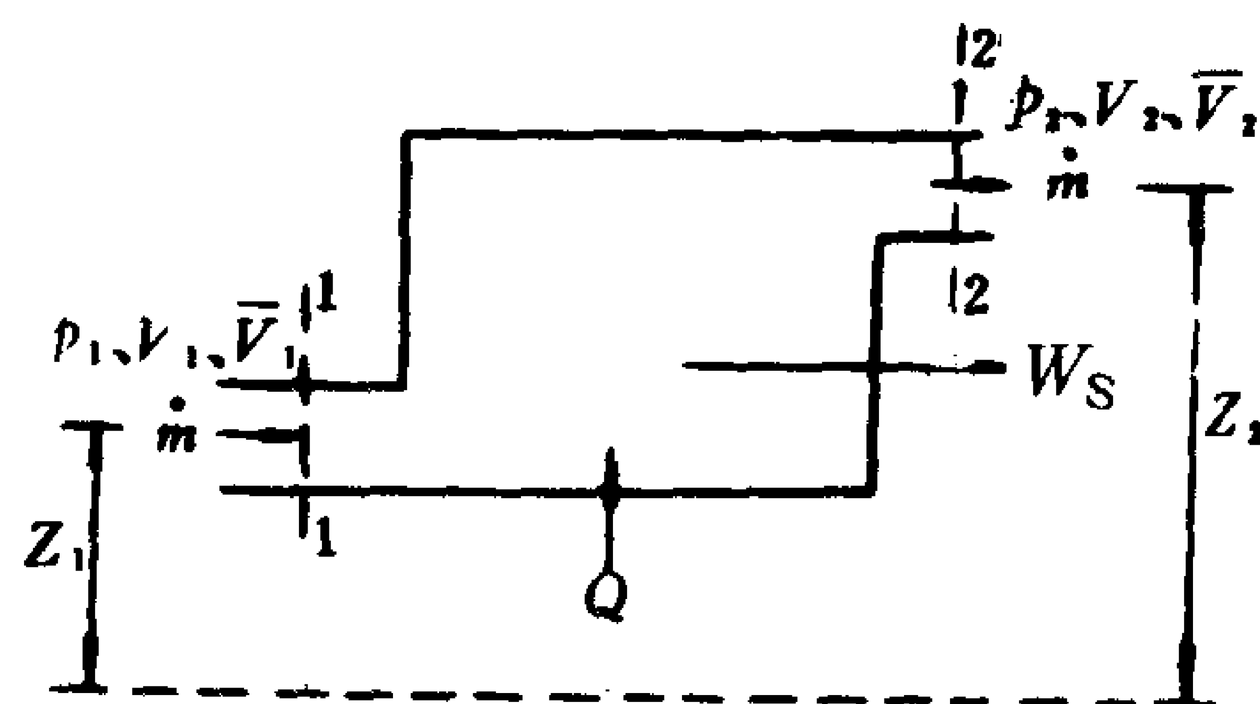


图1.1.4-1 稳定流动系统

式中：$\frac{\dot{m}}{2}\Delta \bar{V}^2$——$\dot{m}$公斤质量工质流出和流入系统的功能差；

$\Delta(pV)$——$\dot{m}$公斤质量工质流出和流入系统的推挤净功；

$\dot{m}g\Delta Z$——$\dot{m}$公斤质量工质流出和流入系统的位能差；

W_s——$\dot{m}$公斤质量工质流经系统时对外输出的轴功；

ΔH——$\dot{m}$公斤质量工质流出和流入系统的焓差。

式(1.1.4-16)即是稳定流动开口系统的热力学第一定律表达式。

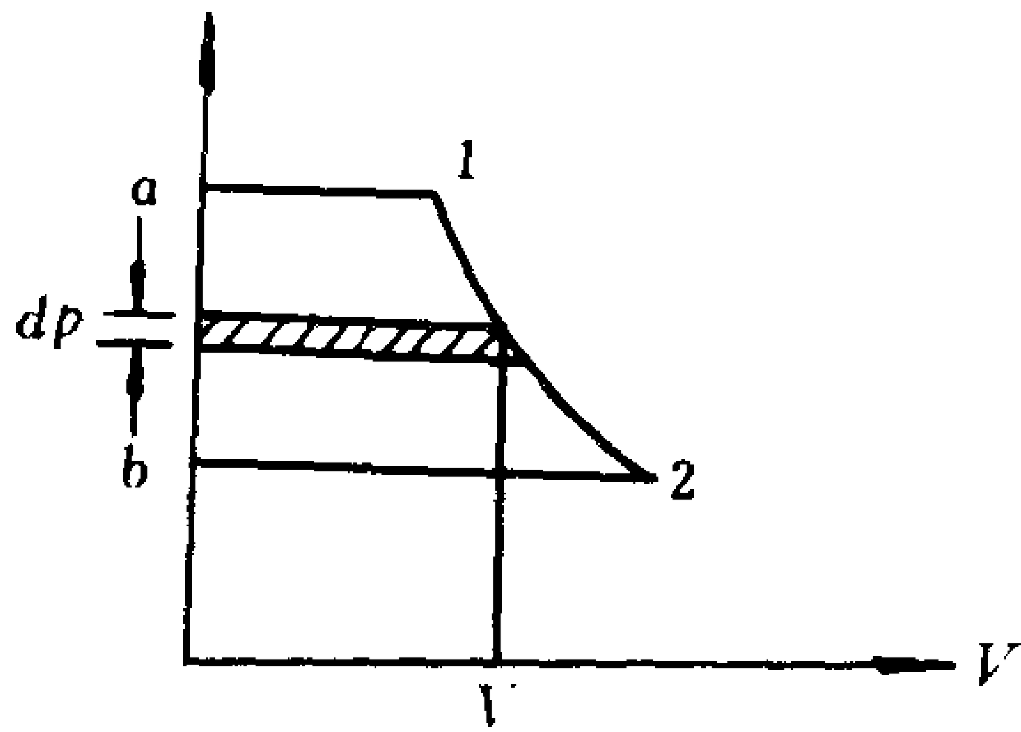


图 1.1.4-2

在热力学分析中，将$\frac{\dot{m}}{2}\Delta \overline{V}^2$、$\dot{m}g\Delta Z$和$Ws$三项之和总称为技术功，即

$$W_t=\frac{\dot{m}}{2}\Delta \overline{V}^2+\dot{m}g\Delta Z+Ws \quad (1.1.4\text{-}17)$$

在可逆过程中

$$W_t=-\int_1^2 Vdp \quad (1.1.4\text{-}18)$$

如图 1.1.4-2 所示。

因此，稳定流动开口系的热力学第一定律的表达式可写成

$$Q=\Delta H-\int_1^2 Vdp \quad (1.1.4\text{-}19)$$

2.3 稳定流动能量方程的应用

表 1.1.4-1　式(1.1.4-16)在热工设备上的应用

热工设备	能量转换关系式	说明
燃气轮机、蒸汽轮机	$Ws=-\Delta H=H_1-H_2$	工质与外界绝热；忽略工质动能和位能的变化
压气机、水泵	$-Ws=\Delta H=H_2-H_1$	工质与外界绝热；忽略工质动能和位能的变化

热工设备	能量转换关系式	说明
锅炉、各种加热器	$Q=\Delta H=H_2-H_1$	忽略工质动能和位能的变化
冷疑器、各种冷却器	$-Q=-\Delta H=H_1-H_2$	忽略工质动能和位能的变化
喷管	$\frac{\dot{m}\Delta\Delta\overline{V}^2}{2}=-\Delta H=H_1-H_2$	工质与外界绝热；忽略工质位能的变化
管路	$\frac{\dot{m}}{2}\Delta\overline{V}^2-Q=-\Delta H=H_1-H_2$	忽略工质位能的变化
	$Q=-\Delta H=H_1-H_2$	忽略工质动能和位能的变化
孔板、阀门节流	$\Delta H=0,\quad H_1=H_2$	工质与外界绝热；忽略工质动能和位能的变化

3 热力学第二定律及其应用

热力学第二定律是说明能量传递和转换过程进行的方向、条件和限度，其有多种表述方法，主要有（1）克劳休斯说法："不可能将热量从低温物体传到高温物体而不产生其它变化"；（2）开尔文说法："不可能从单一热源吸取热量使之完全变为有用功而不产生其它变化"。这两种说法是等效的。

因此，热力学第二定律也可表述为："第二类永动机（单热源的热机）是创造不成功的"。

3.1　卡诺循环和卡诺定理

卡诺循环是由两个定温过程及两个等熵过程组成的可逆循环。卡诺循环分正卡诺循环如图 1.1.4-3 及逆卡诺循环如图 1.1.4-4。

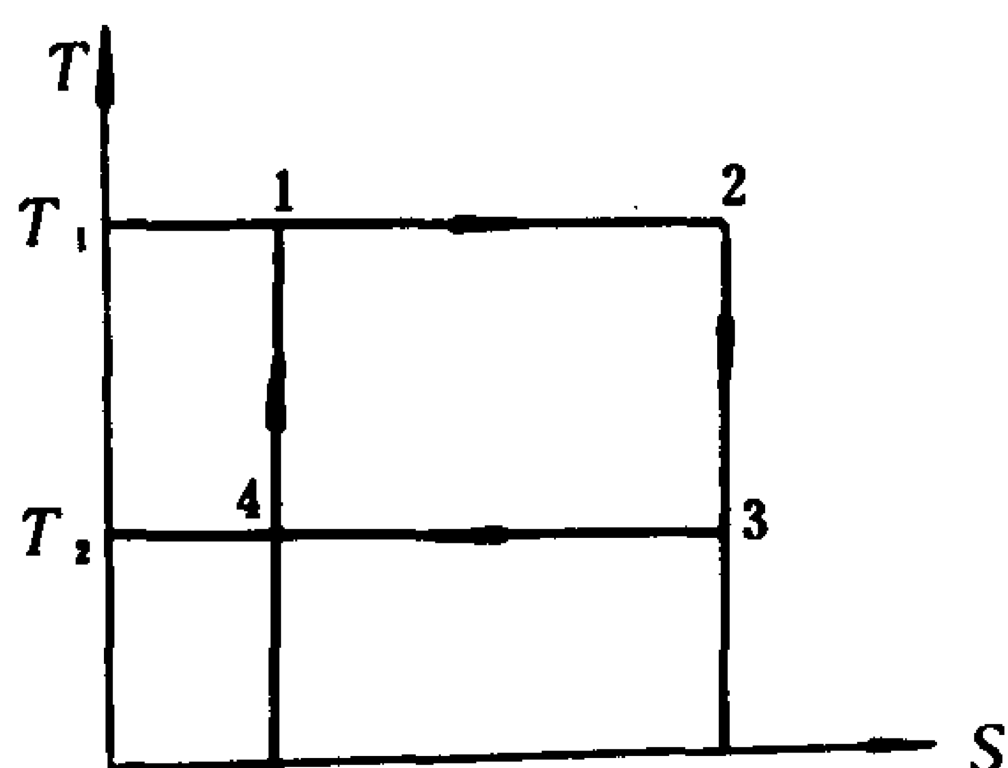


图 1.1.4-3　正卡诺循环

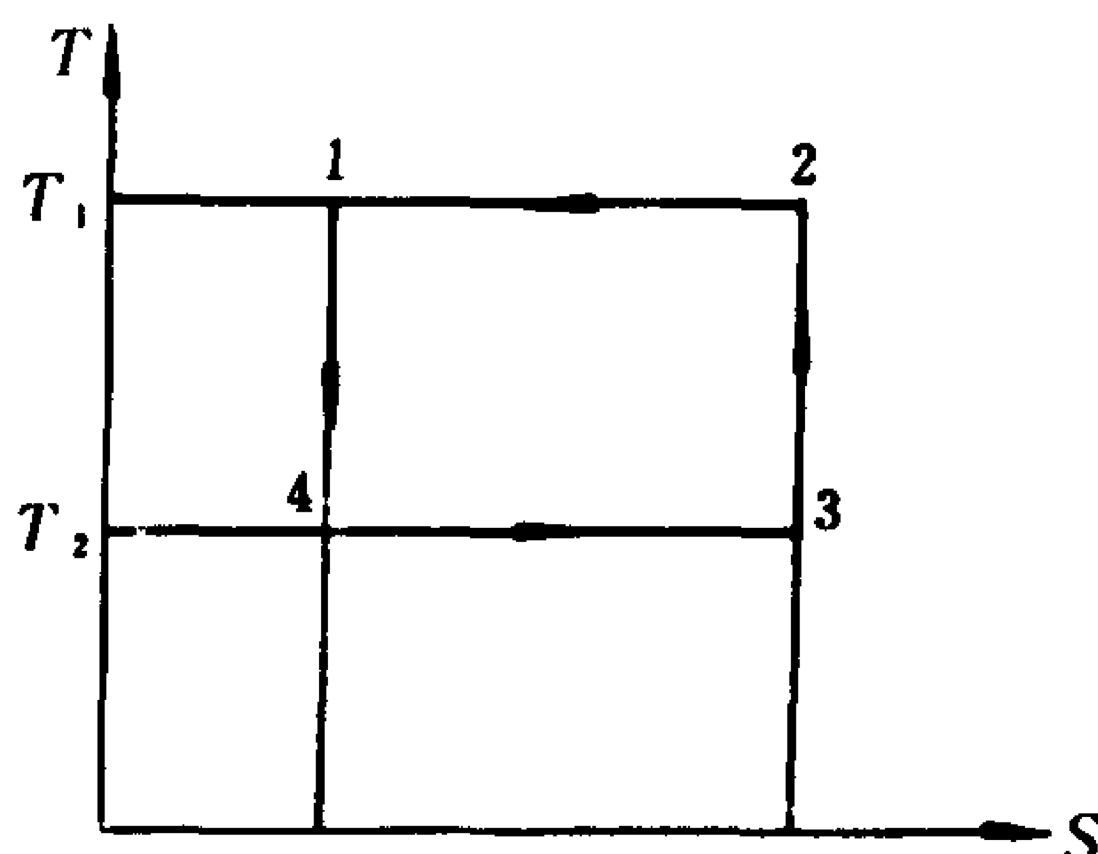


图 1.1.4-4　逆卡诺循环

正卡诺循环的热效率

$$\eta_k=\frac{W}{Q_1}=\frac{|Q_1|-|Q_2|}{|Q_1|}=1-\frac{|Q_2|}{|Q_1|}=1-\frac{T_2}{T_1} \tag{1.1.4-20}$$

式中：T_1——热源的绝对温度；

T_2——冷源的绝对温度。

由此可见，卡诺循环的热效率只取决于热源及冷源的温度，提高热源温度 T_1和降低冷源温度 T_2，都可以使循环热效率提高。

逆卡诺循环的经济指标，用制冷系数ε_k表示，即

$$\varepsilon_k=\frac{Q_2}{-W_k}=\frac{1}{\frac{|Q_1|}{|Q_2|}-1}=\frac{1}{\frac{T_1}{T_2}-1}=\frac{T_2}{T_1-T_2} \tag{1.1.4-21}$$

式中：T_1——热源(环境)的绝对温度；

T_2——冷源(冷藏室)的绝对温度。

由此可见，因为 $T_1>T_2$，制冷系数ε_k恒为正值，且可以大于 1；(T_1-T_2)愈小，ε_k愈大。

当逆卡诺循环用作热泵循环供热时，其经济指标用供热系数ε_k'表示，即

$$\varepsilon_k'=\frac{Q_1}{-W_k}=\frac{1}{1-\frac{|Q_2|}{|Q_1|}}=\frac{1}{1-\frac{T_2}{T_1}}=\frac{T_1}{T_1-T_2} \tag{1.1.4-22}$$

式中：T_1——热源(暖室)的绝对温度；

T_2——冷源(环境)的绝对温度。

供热系数ε_k'和制冷系数ε_k之间的关系为

$$\varepsilon_k'=\varepsilon_k+1 \tag{1.1.4-23}$$

即热泵的供热系数比工作在相同温度范围下制冷机的制冷系数多 1。

应用热力学第二定律可以证明，在热源温度 T_1和冷源温度 T_2之间工作的一切热机循环，以卡诺循环热效率为最高；卡诺循环的热效率与工质性和热机类型无关；逆卡诺循环的制冷系数为工作在相同条件下一切制冷机循环制冷系数的最大值，这就是卡诺定理的内容。

3.2 熵

熵是克劳休斯根据卡诺循环及其热效率所导出的一个状态参数。从这一点出发得到，任意工质经过一个可逆循环后，微量$\frac{\delta q}{T}$沿整个循环的积分为零，即

$$\oint \frac{\delta q}{T}=0 \tag{1.1.4-24}$$

可见，$\frac{\delta q}{T}$的积分与途径无关，因此，$\frac{\delta q}{T}$是某一状态参数的全微分，称这个状态参数为熵s，即

$$ds=\frac{\delta q}{T} \tag{1.1.4-25}$$

这就是状态参数熵的定义式。

对于任意的不可逆循环有：

$$\oint \frac{\delta q}{T}<0 \tag{1.1.4-26}$$

上式称为克劳休斯积分不等式。

将式(1.1.4-24)和 (1.1.4-26)归并得：

$$\oint \frac{\delta q}{T}\leq 0 \tag{1.1.4-27}$$

式中，等于零时为可逆循环，小于零时为不可逆循环。这是作为判断循环是否可逆的判别式。

可以推得：

$$S_2-S_1\geqq \int_1^2 \frac{\delta q}{T} \tag{1.1.4-28}$$

即，可逆过程比熵的变化等于$\int_1^2 \frac{\delta q}{T}$，不可逆过程比熵的变化大于$\int_1^2 \frac{\delta q}{T}$。

将式(1.1.4-28)应用于孤立系统，则孤立系统熵的变化量$ds_{i,s}$为：

$$ds_{i,s}\geqq 0 \tag{1.1.4-29}$$

式中，等号适用于可逆过程，大于号适用于不可逆过程。可见，$ds_{i,s}$是由于过程的不可逆性所产生的熵增量，其值恒大于零。式(1.1.4-29)表示孤立体系熵增原理的数学表达式，也可作为热力学第二定律更有概括性的数学表达式。

3.3 熵流与熵产

沿任何过程（可逆或不可逆)的克劳修斯积分，称为熵流，用符号ΔS_{ef}表示，即

$$\Delta S_{ef}=\int_1^2 \frac{\delta q}{T}$$

将过程的熵变化量与熵流之差，定义为熵产，以符号ΔS_{eg}表示，即

$$\Delta S_{eg}=(S_2-S_1)-\int_1^2 \frac{\delta q}{T}=(S_2-S_1)-\Delta S_{ef}$$

故系统的熵变化量为

$$S_2-S_1=\Delta S_{ef}+\Delta S_{eg}$$

可见，在可逆过程中，熵产为零，系统熵变化量等熵流。在不可逆过程中，熵产大于零，不

论什么过程，熵产永远不会小于零。熵产愈大，说明系统作功能力的损失愈大。

例 1：在一标准大气压力下，即压力为 0.1013 MPa时，将 1 kg温度为 100℃ 的水在可逆定温过程中进行加热，使其汽化变为 1 kg温度为 100℃ 的水蒸汽，需要从热源吸收热量 2257 kJ/kg，试求其比熵的变化量。

解：由于定温过程是可逆的，所以热源的温度等于工质的温度，按式(1.1.4-28)得

$$S_2-S_1=\int_1^2\left(\frac{\delta q}{T}\right)_{re}=\frac{q_{1-2}}{T}=\frac{2257}{273.16+100}=6.048\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

例 2：在一标准大气压力下，用 500 K 的恒温器将 1 kg温度为 100℃ 的水完全汽化为 100℃ 的水蒸汽，需要热量 2257 kJ/kg，试求这一过程中系统比熵的变化量。

解：此系统经历的过程为不可逆过程，故不能套用式(1.1.4-28)，即

$$S_2-S_1\neq\int_1^2\left(\frac{\delta q}{T}\right)_{ir}=\frac{q_{1-2}}{T}=\frac{2257}{500}=4.514\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

为计算本题比熵的变化，设想 500 K 的热源先传给 100℃ 的中间热源，然后由中间热源把热量传给系统，则中间热源与系统之间的传热过程就成为可逆过程。因此可按此设想的可逆过程代替原来的过程进行计算，即可应用式(1.1.4-28)算得系统的比熵变化量，

$$S_2-S_1=\int_1^2\left(\frac{\delta q}{T}\right)_{re}=\frac{q_{1-2}}{T_c}=\frac{2257}{100+273.16}=6.048\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}。$$

结果与例 1 完全一致。

例 3：试分别计算例 1 和例 2 的熵产。

解：例 1 是可逆等温加热过程，所以熵产为零，即$\Delta S_{eg}=0$，系统比熵变化等于熵流。

例 2 中，比熵的变化量为

$$S_2-S_1=\frac{q_{1-2}}{T_c}=\frac{2257}{373.16}=6.048\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

比熵流为

$$\Delta S_{ef}=\frac{q_{1-2}}{T}=\frac{2257}{500}=4.514\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

则比熵产为

$$\Delta S_{eg}=(S_2-S_1)-\Delta S_{ef}=\frac{q_{1-2}}{T_c}-\frac{q_{1-2}}{T}=q_{1-2}\left(\frac{1}{T_c}-\frac{1}{T}\right)$$

$$=2257\times\left(\frac{1}{373.16}-\frac{1}{500}\right)=1.534\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

可见，系统比熵变化量

$$S_2-S_1=\Delta S_{ef}+\Delta S_{eg}=4.514+1.534=6.048\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

这是一致的。由此就可清楚地看到，为什么在不可逆过程中，$S_2-S_1>\int_1^2\left(\frac{\delta q}{T}\right)_{ir}$的原因。

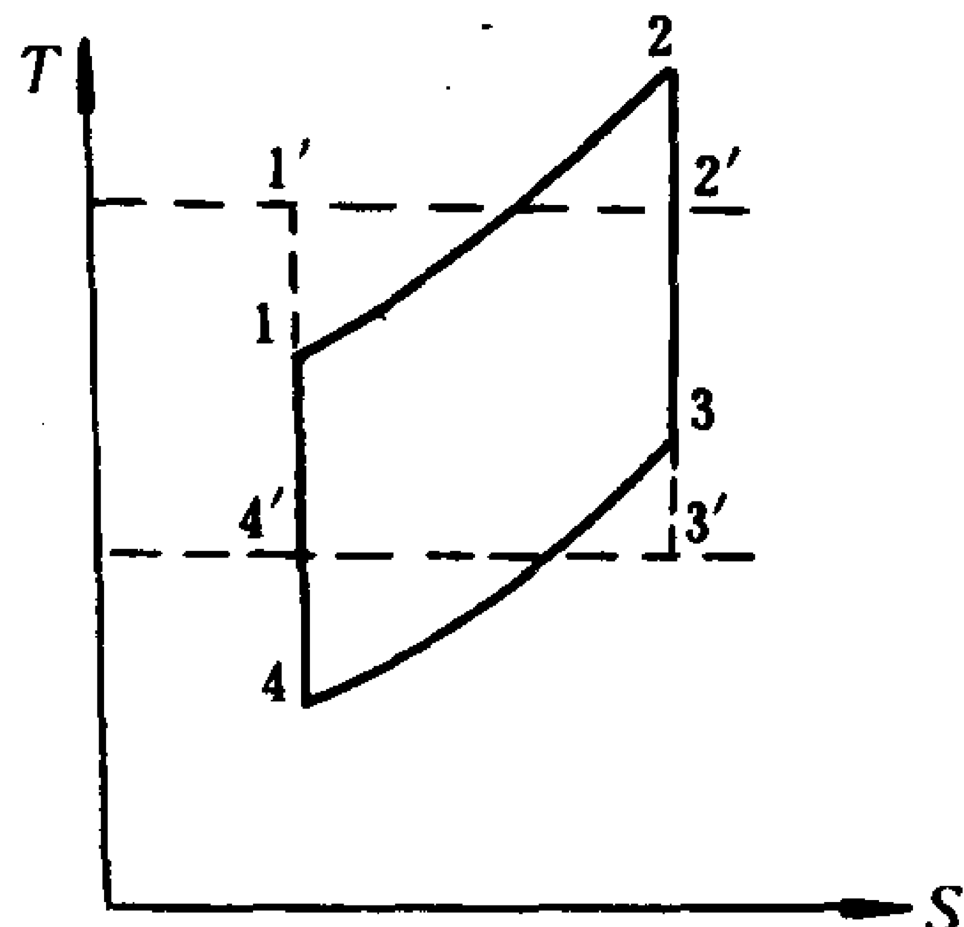


图 1.1.4-5 平均吸热和平均放热温度

3.4 热力学第二定律的应用

1)提高热机循环热效率的途径

实际循环的吸、放热过程往往是在变温情况下进行的。应用平均吸热温度 T_{1m} 和平均放热温度 T_{2m} 的概念，如图

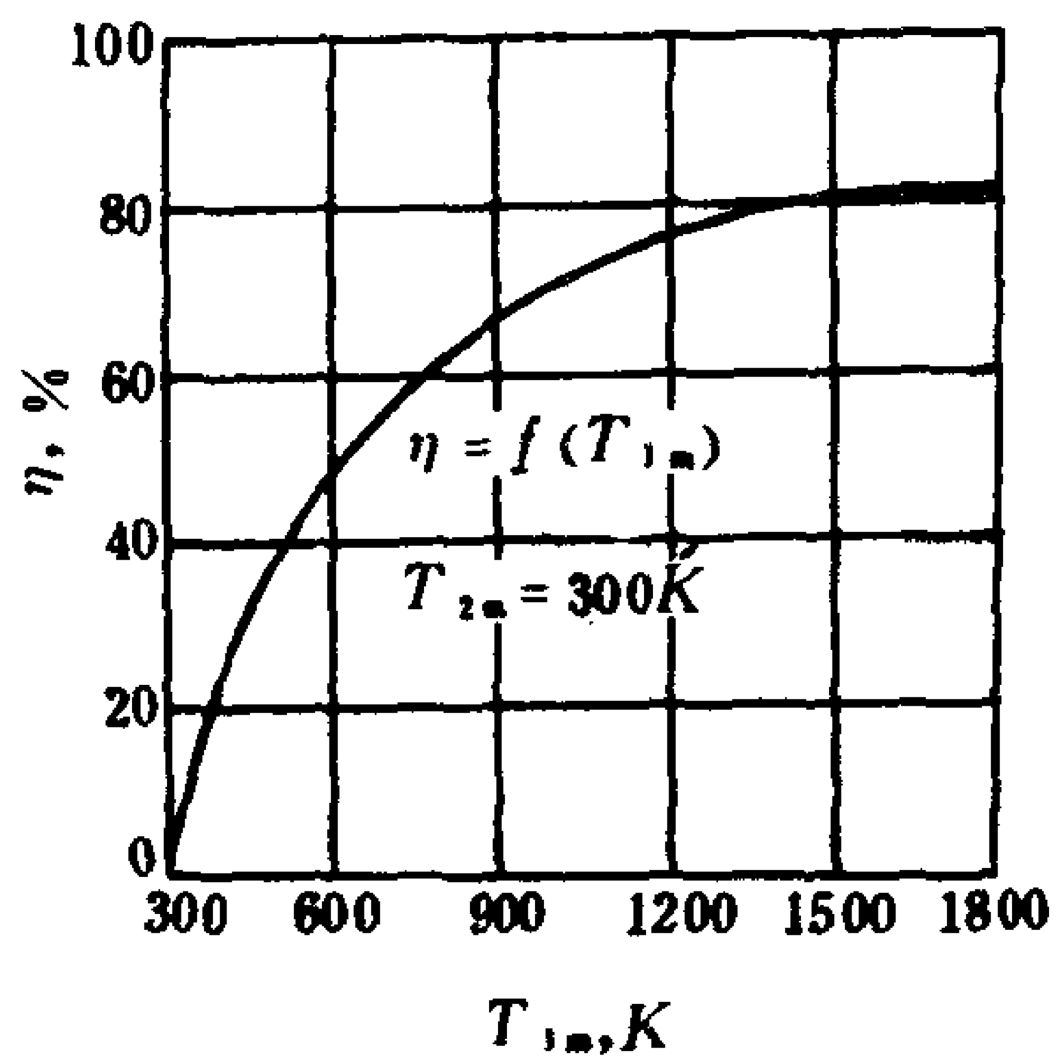


图 1.1.4-6 η与T_{1m}的关系

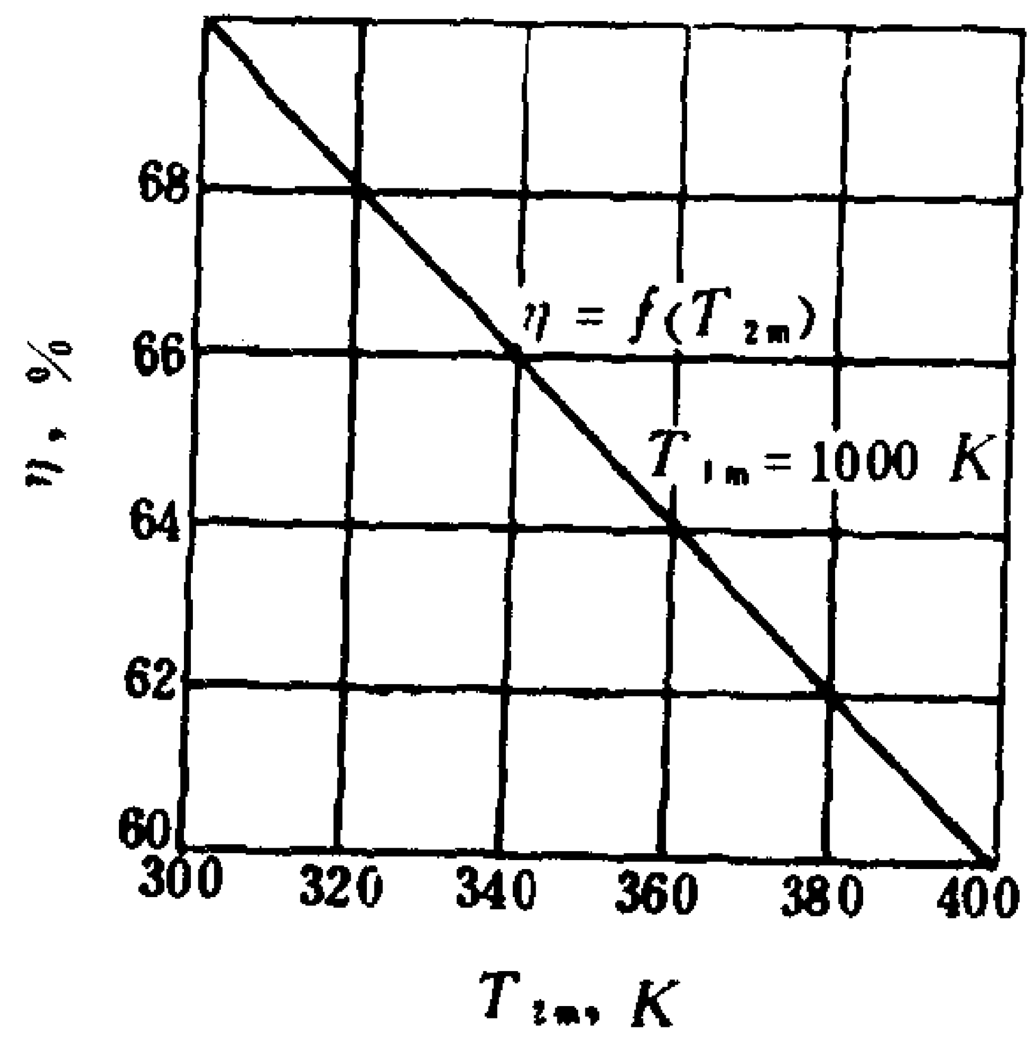


图 1.1.4-7 η与T_{2m}的关系

1.1.4-5。则循环热效率为：

$$\eta=1-\frac{|q_2|}{|q_1|}=1-\frac{T_{2m}}{T_{1m}} \qquad (1.1.4\text{-}30)$$

上式指明，欲提高循环热效率，必须设法提高吸热平均温度，设法降低放热平均温度，这是提高循环热效率的根本途径。图 1.1.4-6 和 1.1.4-7 标明了η与T_{1m}、T_{2m}的关系。

现代的各种热力发动机都是根据这一途径去寻求热效率的提高。

2)提高热量作功能力的途径

若卡诺循环在热源温度T_1和环境温度T_0间工作，如图 1.1.4-8。循环从热源吸收热量q_1中，其最大的作功能力，即热量比㶲为：

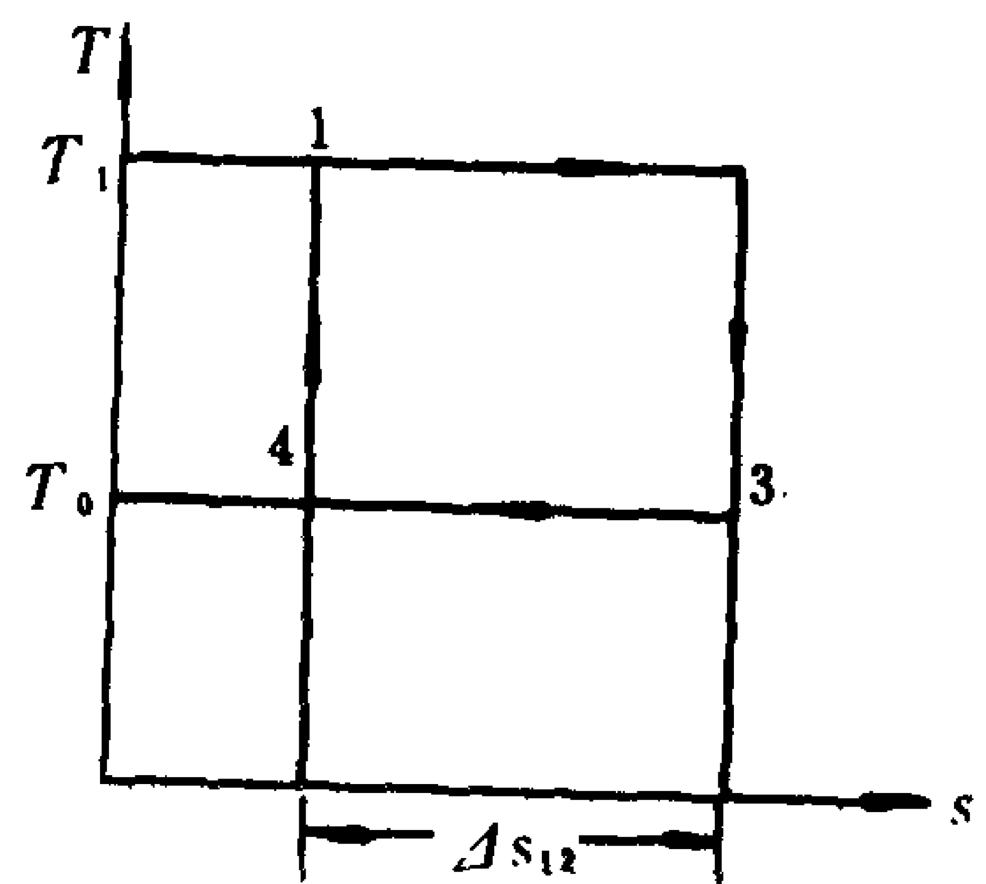


图 1.1.4-8 热流㶲

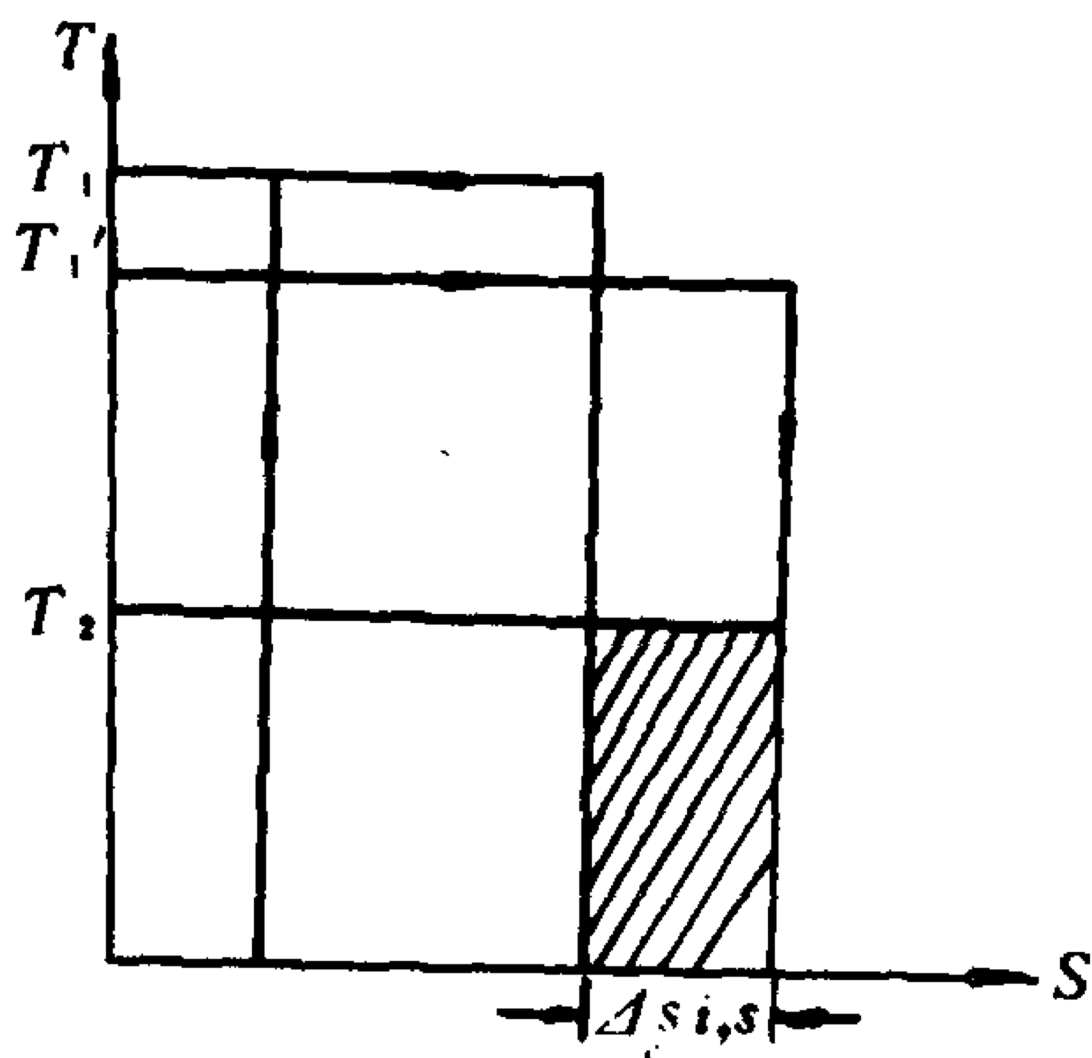


图 1.1.4-9 有温差传热损失

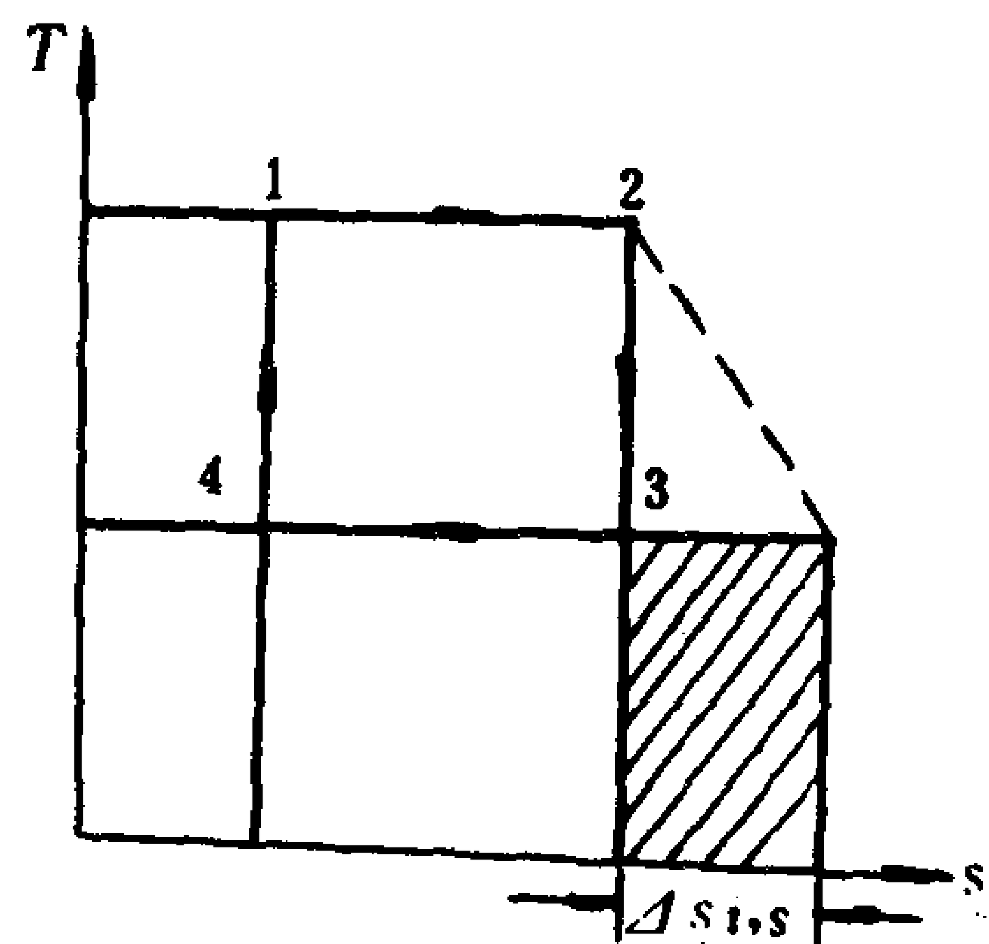


图 1.1.4-10 有涡流、摩擦的不可逆损失

$$e_q=(1-\frac{T_0}{T_1})q_1 \quad (1.1.4\text{-}31)$$

可见，热源的温度愈高，即T_1愈大，则吸收相同热量q_1的热流比㶲愈大（或作功能力愈大）。从图中直接得出，

$$q_1=T_1\Delta s_{12} \quad (1.1.4\text{-}32)$$

及

$$e_q=(T_1-T_0)\Delta s_{12} \quad (1.1.4\text{-}33)$$

在最理想的情况下，仍不能转换为功而必须向冷源放出的热量，称为热量q_1的不可用能或叫热量炕，用a_q表示，即

$$a_q=q_1-e_q=T_0\Delta s_{12} \quad (1.1.4\text{-}34)$$

因此，吸热时热源温度下愈低，同样数量的热量q_1时，吸热熵增Δs_{12}愈大，热量炕a_q愈大，说明此时q_1的作功能力愈小。

3）衡量过程不可逆性的程度

图1.1.4-9为有温差传热的不可逆过程，图1.1.4-10为有摩擦、涡流引起的不可逆过程。从这两个图中可以看到，由热源、工质和冷源组成的孤立系统，不论是有温差传热或者有摩擦、涡流等不可逆因素，都导致系统总熵增加，造成系统作功能力的损失，即

$$\text{系统作功能力损失}=T_2\Delta s_{i,s} \quad (1.1.4\text{-}35)$$

图中的阴影部分表示$T_2\Delta s_{i,s}$。可见，实际过程存在的不可逆性愈大，系统作功能力的损失愈大。对此类损失，应当采用措施使热变功时的不可逆程度尽量小，力求热力过程的完善性。

4 理想气体及其热力性质

理想气体是一种假想的气体，即假定其分子是些弹性的、不占据体积的质点，分子之间不存在作用力，这种气体称为理想气体。在压力足够低、密度足够小的情况下，各种气体都接近理想气体的性质，如工程中常用的气体O_2、H_2、N_2、CO、CO_2等及其混合物空气、燃气和烟气等，在通常使用的温度、压力下都可以看作理想气体。

4.1 理想气体状态方程

不同物量的理想气体状态方程归纳为：

1千克气体 $$pv=RT \quad (1.1.4\text{-}36)$$

m千克气体 $$pV=mRT \quad (1.1.4\text{-}37)$$

1千摩尔气体 $$pV_m=R_mT \quad (1.1.4\text{-}38)$$

n千摩尔气体 $$pV=nR_mT \quad (1.1.4\text{-}39)$$

式中：R——气体常数，J/(kg·K)；

R_m——通用气体常数，其数值与气体种类无关。R_m=8314.3 J/(kmol·K)。

由于$R_m=\mu R$，因而任意一种气体的气体常数R可按下式求得：

$$R=\frac{R_m}{\mu}=\frac{8314.3}{\mu}\quad \text{J/(kmol·K)} \quad (1.1.4\text{-}40)$$

式中：μ——气体分子量。

表1.1.4-2给出了一些气体的千摩尔质量及气体常数的数值。

表 1.1.4-2　　一些气体的千摩尔质量、气体常数和低压下比热

物　质	μ $\frac{kg}{kmol}$	c_p $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	μc_p $\frac{kJ}{(kmol\cdot K)}$	c_v $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	μc_v $\frac{kJ}{(kmol\cdot k)}$	R $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	K $\frac{c_p}{c_v}$
氩　Ar	39.94	0.523	20.89	0.315	12.57	0.208	1.67
氦　He	4.003	5.200	20.81	3.123	12.50	2.077	1.67
氢　H_2	2.016	14.32	28.86	10.19	20.55	4.124	1.40
氮　N_2	28.02	1.038	29.08	0.742	20.77	0.297	1.40
氧　O_2	32.00	0.917	29.34	0.657	21.03	0.260	1.39
一氧化碳 CO	28.01	1.042	29.19	0.745	20.88	0.297	1.40
空　气	28.97	1.004	29.09	0.718	20.78	0.287	1.40
水蒸汽 H_2O	18.016	1.867	33.64	1.406	25.33	0.461	1.33
二氧化碳CO_2	44.01	0.845	37.19	0.656	28.88	0.189	1.29
二氧化硫SO_2	64.07	0.644	41.26	0.514	32.94	0.130	1.25
甲　烷　CH_4	16.04	2.227	35.72	1.709	27.41	0.518	1.30
丙烷　C_3H_8	44.09	1.691	74.56	1.502	66.25	0.189	1.13

4.2　理想气体的比热

根据比热的定义和分类，可将各种比热之间关系表示如图 1.1.4-11。

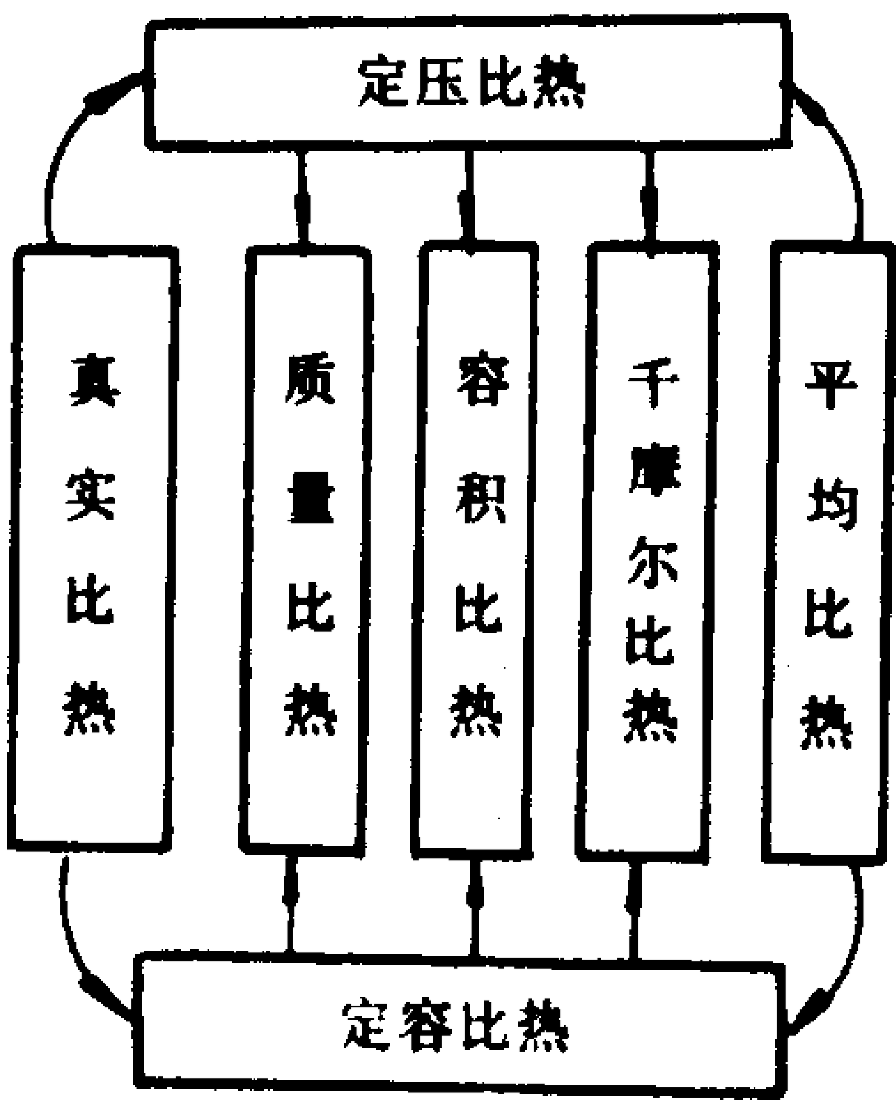


图 1.1.4-11　各种比热之间的关系

相应的比热名称、数值符号和单位列于表 1.1.4-3。

质量比热、容积比热及摩尔比热之间的换算关系为:

$$\mu c=\mu\cdot c=22.4c' \qquad (1.1.4\text{-}41)$$

应用比热计算热量的方法:

1)定值比热

定值比热是认为气体的比热值与温度无关。实际上气体比热是温度的复杂函数，随温度的升高而增大。但当气体温度较低且变化范围不大时，或者对计算精确度要求不高，为了简化计算，比热可近似地当作定值。表 1.1.4-4 为理想气体的定值摩尔比热。

表 1.1.4-3　　比热名称、数值符号及单位

名　称	数　值　符　号	单　位
质量比热	c_v及c_p	kJ/(kg·K)
摩尔比热	μc_v及μc_p	kJ/(kmol·K)
容积比热	c'_v及c'_p	kJ/(Nm³·K)

表 1.1.4-4　　理想气体的定值摩尔比热表

单　位	单原子气体 $\frac{kJ}{kmol\cdot K}$	双原子气体 $\frac{KJ}{kmol\cdot K}$	多原子气体 $\frac{kJ}{kmol\cdot K}$
μc_v	3×4.1868	5×4.1868	7×4.1868
μc_p	5 ×4.1868	7 ×4.1868	9 ×4.1868
k	1.67	1.40	1.29

定值质量比热和定值容积比热，可根据式(1.1.4-41)算出。

2）真实比热

真实比热是某一温度t时气体的真实比热值。表 1.1.4-5 列出了一些气体的真实定压摩尔比热与温度之间的三次方经验式。

气体的真实定压摩尔比热公式

表 1.1.4-5　　$\mu c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3$ kJ/(kmol · K)

气　体	a_0	$a_1 \times 10^3$	$a_2 \times 10^6$	$a_3 \times 10^9$	温度范围K	最大误差%
H_2	29.21	−1.916	−4.004	−0.8705	273～1800	1.01
O_2	25.48	15.20	5.062	1.312	273～1800	1.19
N_2	28.90	−1.570	8.081	−28.73	273～1800	0.59
CO	28.16	1.675	5.372	−2.222	273～1800	0.89
CO_2	22.26	59.811	−35.01	7.470	273～1800	0.647
空气	28.15	1.967	4.801	−1.966	273～1800	0.72
H_2O(汽)	32.24	19.24	10.56	−3.595	273～1500	0.52
CH_4	19.89	50.24	12.69	−11.01	273～1500	1.33
C_2H_4	4.026	155.0	−81.56	16.98	298～1500	0.30
C_2H_6	5.414	178.1	−69.38	8.712	298～1500	0.70
C_3H_6	3.746	234.0	−115.1	29.31	298～1500	0.44
C_3H_8	−4.220	306.3	−158.6	32.15	298～1500	0.28

3）平均比热

平均比热是指温度自t_1升高到t_2时气体的平均比热值，用下式表示

$$C_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{12}}{t_2 - t_1} = \frac{\int_1^2 c dt}{t_2 - t_1} \tag{1.1.4-42}$$

热工计算用的平均比热表，是按照温度自0℃到某一温度的平均比热值来编制的，如

$$C_m|_{t_0}^{t_2} = \frac{C_m|_{t_0}^{t_2} t_2 - C_m|_{t_0}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \tag{1.1.4-43}$$

气体的平均比热表见 1.1.4-6 至 1.1.4-11。

气体的平均定压摩尔比热

表 1.1.4-6　　单位：kJ/(kmol · K)

温度℃ \ 气体	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
0	29.274	29.115	29.123	35.860	33.499	38.854	29.073
100	29.538	29.144	29.178	38.112	33.741	40.654	29.153
200	29.931	29.228	29.303	40.059	34.118	42.329	29.299
300	30.400	29.383	29.517	41.755	34.575	43.878	29.521
400	30.878	29.601	29.789	43.250	35.090	45.217	29.789
500	31.334	29.864	30.099	44.573	35.630	46.390	30.095
600	31.761	30.149	30.425	45.753	36.195	47.353	30.405
700	32.150	30.451	30.752	46.813	36.789	48.232	30.723
800	32.502	30.748	31.070	47.763	37.392	48.944	31.028
900	32.825	31.037	31.376	48.617	38.008	49.614	31.321
1000	33.118	31.313	31.665	49.392	38.619	50.158	31.598
1100	33.386	31.577	31.937	50.099	39.226	50.660	31.862
1200	33.633	31.828	32.192	50.740	39.285	51.079	32.109
1300	33.863	32.067	32.427	51.322	40.407	51.623	32.343
1400	34.076	32.293	32.653	51.858	40.976	51.958	32.565
1500	34.282	32.502	32.858	52.348	41.525	52.251	32.774
1600	34.474	32.699	33.051	52.800	42.056	52.544	32.967
1700	34.658	32.883	33.231	53.218	42.576	52.796	33.151
1800	34.834	33.055	33.402	53.604	43.070	53.047	33.319

续上表

温度℃ \ 气体	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
1900	35.006	33.218	33.561	53.959	43.539	53.214	33.482
2000	35.169	33.373	33.708	54.290	43.995	53.465	33.641
2100	35.328	33.520	33.850	54.596	44.435	53.633	33.787
2200	35.483	33.658	33.980	54.881	44.853	53.800	33.926
2300	35.634	33.787	34.106	55.144	45.255	53.968	34.060
2400	35.785	33.909	34.223	55.391	45.644	54.135	34.185
2500	35.927	34.022	34.336	55.617	46.017	54.261	34.307
2600	36.069	34.206	34.499	55.852	46.381	54.387	34.332
2700	36.207	34.290	34.583	56.061	46.729	54.512	34.457
2800	36.341	34.415	34.667	56.229	47.060	54.596	34.541
2900	36.509	34.499	34.750	56.438	47.378	54.721	34.625
3000	36.676	34.583	34.834	56.606	—	54.847	34.709
*M*①	32.000	28.016	28.010	44.010	18.020	64.06	28.964

① 表中末行*M*为物质的分子量。

气体的平均定容摩尔比热

表 1.1.4-7　　单位：kJ/(kmol · K)

温度℃ \ 气体	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
0	20.959	20.800	20.808	27.545	25.184	30.522	20.758
100	21.223	20.829	20.863	29.797	25.426	32.322	20.838
200	21.616	20.913	20.988	31.744	25.803	33.997	20.984
300	22.085	21.068	21.202	33.440	26.260	35.546	21.206
400	22.563	21.286	21.474	34.935	26.775	36.886	21.474
500	23.019	21.549	21.784	36.258	27.315	38.058	21.780
600	23.446	21.834	22.100	37.438	27.880	39.021	22.090
700	23.835	22.136	22.437	38.498	28.474	39.900	22.408
800	24.187	22.433	22.755	39.448	29.077	40.612	22.713
900	24.510	22.722	23.061	40.302	29.693	41.282	23.006
1000	24.803	22.998	23.350	41.077	30.304	41.826	23.283
1100	25.071	23.262	23.622	41.784	30.911	42.329	23.541
1200	25.318	23.513	23.877	42.425	31.510	42.747	23.794
1300	25.548	23.752	24.112	43.007	32.092		24.028
1400	25.761	23.978	24.338	43.543	32.661		24.250
1500	25.967	24.187	24.543	44.033	33.210		24.459
1600	26.159	24.384	24.736	44.485	33.741		24.652
1700	26.343	24.568	24.916	44.903	34.261		24.836
1800	26.519	24.740	25.087	45.289	34.755		25.004
1900	26.691	24.903	25.246	45.644	35.224		25.167
2000	26.854	25.058	25.393	45.675	35.680		25.326
2100	27.013	25.205	25.535	46.281	36.120		25.472
2200	27.168	25.343	25.665	46.566	36.538		25.611
2300	27.319	25.472	25.791	46.829	36.940		25.745
2400	27.470	25.594	25.908	47.076	37.330		25.870
2500	27.612	25.707	26.021	47.302	37.702		25.992
2600	27.754				38.066		
2700	27.892				38.414		
2800					38.745		
2900					39.063		
3000							
M	32.000	28.016	28.010	44.010	18.020	64.06	28.964

气体的平均定压质量比热

表 1.1.4-8 单位：kJ/(kg · K)

气体 温度℃	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
0	0.915	1.039	1.040	0.815	1.859	0.607	1.004
100	0.923	1.040	1.042	0.866	1.873	0.636	1.006
200	0.935	1.043	1.046	0.910	1.894	0.662	1.012
300	0.950	1.049	1.054	0.949	1.919	0.687	1.019
400	0.965	1.057	1.063	0.983	1.948	0.708	1.028
500	0.979	1.066	1.075	1.013	1.978	0.724	1.039
600	0.993	1.076	1.086	1.040	2.009	0.737	1.050
700	1.005	1.087	1.098	1.064	2.042	0.754	1.061
800	1.016	1.097	1.109	1.085	2.075	0.762	1.071
900	1.026	1.108	1.120	1.104	2.110	0.775	1.081
1000	1.035	1.118	1.130	1.122	2.144	0.783	1.091
1100	1.043	1.127	1.140	1.138	2.177	0.791	1.100
1200	1.051	1.136	1.149	1.153	2.211	0.795	1.108
1300	1.058	1.145	1.158	1.166	2.243	—	1.117
1400	1.065	1.153	1.166	1.178	2.274	—	1.124
1500	1.071	1.160	1.173	1.189	2.305	—	1.131
1600	1.077	1.167	1.180	1.200	2.335	—	1.138
1700	1.083	1.174	1.187	1.209	2.363	—	1.144
1800	1.089	1.180	1.192	1.218	2.391	—	1.150
1900	1.094	1.186	1.198	1.226	2.417	—	1.156
2000	1.099	1.191	1.203	1.233	2.442	—	1.161
2100	1.104	1.197	1.208	1.241	2.466	—	1.166
2200	1.109	1.201	1.213	1.247	2.489	—	1.171
2300	1.114	1.206	1.218	1.253	2.512	—	1.176
2400	1.118	1.210	1.222	1.259	2.533	—	1.180
2500	1.123	1.214	1.226	1.264	2.554	—	1.184
2600	1.127	—	—	—	2.574	—	—
2700	1.131	—	—	—	2.594	—	—
2800	—	—	—	—	2.612	—	—
2900	—	—	—	—	2.630	—	—
3000	—	—	—	—	—	—	—

气体的平均定容质量比热

表 1.1.4-9 单位：kJ/(kg · K)

气体 温度℃	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
0	0.655	0.742	0.743	0.626	1.398	0.477	0.716
100	0.663	0.744	0.745	0.677	1.411	0.507	0.719
200	0.675	0.747	0.749	0.721	1.432	0.532	0.724
300	0.690	0.752	0.757	0.760	1.457	0.557	0.732
400	0.705	0.760	0.767	0.794	1.486	0.578	0.741
500	0.719	0.769	0.777	0.824	1.516	0.595	0.752
600	0.733	0.779	0.789	0.851	1.547	0.607	0.762
700	0.745	0.790	0.801	0.875	1.581	0.624	0.773
800	0.756	0.801	0.812	0.896	1.614	0.632	0.784

续上表

气体 / 温度℃	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
900	0.766	0.811	0.823	0.916	1.648	0.645	0.794
1000	0.775	0.821	0.834	0.933	1.682	0.653	0.804
1100	0.783	0.830	0.843	0.950	1.716	0.662	0.813
1200	0.791	0.839	0.857	0.964	1.749	0.666	0.821
1300	0.798	0.848	0.861	0.977	1.781	—	0.829
1400	0.805	0.856	0.869	0.989	1.813	—	0.837
1500	0.811	0.863	0.876	1.001	1.843	—	0.844
1600	0.817	0.870	0.883	1.011	1.873	—	0.851
1700	0.823	0.877	0.889	1.020	1.902	—	0.857
1800	0.829	0.883	0.896	1.029	1.929	—	0.863
1900	0.834	0.889	0.901	1.037	1.955	—	0.869
2000	0.839	0.894	0.906	1.045	1.980	—	0.874
2100	0.844	0.900	0.911	1.052	2.005	—	0.879
2200	0.849	0.905	0.916	1.058	2.028	—	0.884
2300	0.845	0.909	0.921	1.064	2.050	—	0.889
2400	0.858	0.914	0.925	1.070	2.072	—	0.893
2500	0.863	0.918	0.929	1.075	2.093	—	0.897
2600	0.868	—	—	—	2.113	—	—
2700	0.872	—	—	—	2.132	—	—
2800	—	—	—	—	2.151	—	—
2900	—	—	—	—	2.168	—	—
3000	—	—	—	—	—	—	—

气体的平均定压容积比热

表 1.1.4-10　　单位：kJ/(m³ · K)

气体 / 温度℃	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空　气
0	1.306	1.299	1.299	1.600	1.494	1.733	1.297
100	1.318	1.300	1.302	1.700	1.505	1.813	1.300
200	1.335	1.304	1.307	1.787	1.522	1.888	1.307
300	1.356	1.311	1.317	1.863	1.542	1.955	1.317
400	1.377	1.321	1.329	1.930	1.565	2.018	1.329
500	1.398	1.332	1.343	1.989	1.590	2.068	1.343
600	1.417	1.345	1.357	2.041	1.615	2.114	1.357
700	1.434	1.359	1.372	2.088	1.641	2.152	1.371
800	1.450	1.372	1.386	2.131	1.668	2.181	1.384
900	1.465	1.385	1.400	2.169	1.696	2.215	1.398
1000	1.478	1.397	1.413	2.204	1.723	2.236	1.410
1100	1.489	1.409	1.425	2.235	1.750	2.261	1.421
1200	1.501	1.420	1.436	2.264	1.777	2.278	1.433
1300	1.511	1.431	1.447	2.290	1.803	—	1.443
1400	1.520	1.441	1.457	2.314	1.828	—	1.453
1500	1.529	1.450	1.466	2.335	1.853	—	1.462
1600	1.538	1.459	1.475	2.355	1.876	—	1.471
1700	1.546	1.467	1.483	2.374	1.900	—	1.479
1800	1.554	1.475	1.490	2.392	1.921	—	1.487
1900	1.562	1.482	1.497	2.407	1.942	—	1.494

续上表

气体 / 温度℃	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空气
2000	1.569	1.489	1.504	2.422	1.963	—	1.501
2100	1.576	1.496	1.510	2.436	1.982	—	1.507
2200	1.583	1.502	1.516	2.448	2.001	—	1.514
2300	1.590	1.507	1.521	2.460	2.019	—	1.519
2400	1.596	1.513	1.527	2.471	2.036	—	1.525
2500	1.603	1.518	1.532	2.481	2.053	—	1.530
2600	1.609	—	—	—	2.069	—	—
2700	1.615	—	—	—	2.085	—	—
2800	—	—	—	—	2.100	—	—
2900	—	—	—	—	2.113	—	—
3000	—	—	—	—	—	—	—

气体的平均定容容积比热

表 1.1.4-11　　单位：kJ/(m³ · K)

气体 / 温度℃	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	空气
0	0.935	0.928	0.928	1.229	1.124	1.361	0.926
100	0.947	0.929	0.931	1.329	1.134	1.440	0.929
200	0.964	0.933	0.936	1.416	1.151	1.516	0.936
300	0.985	0.940	0.946	1.492	1.171	1.597	0.946
400	1.007	0.950	0.958	1.559	1.194	1.645	0.958
500	1.027	0.961	0.972	1.618	1.219	1.700	0.972
600	1.046	0.974	0.986	1.670	1.244	1.742	0.986
700	1.063	0.988	1.001	1.717	1.270	1.779	1.000
800	1.079	1.001	1.015	1.760	1.297	1.813	1.013
900	1.094	1.014	1.029	1.798	1.325	1.842	1.026
1000	1.107	1.026	1.042	1.833	1.352	1.867	1.039
1100	1.118	1.038	1.054	1.864	1.379	1.888	1.050
1200	1.130	1.049	1.065	1.893	1.406	1.905	1.062
1300	1.140	1.060	1.076	1.919	1.432	—	1.072
1400	1.149	1.070	1.086	1.943	1.457	—	1.082
1500	1.158	1.079	1.095	1.964	1.482	—	1.091
1600	1.167	1.088	1.104	1.985	1.505	—	1.100
1700	1.175	1.096	1.112	2.003	1.529	—	1.108
1800	1.183	1.104	1.119	2.021	1.550	—	1.116
1900	1.191	1.111	1.126	2.036	1.571	—	1.123
2000	1.198	1.118	1.133	2.051	1.592	—	1.130
2100	1.205	1.125	1.139	2.065	1.611	—	1.136
2200	1.212	1.130	1.145	2.077	1.630	—	1.143
2300	1.219	1.136	1.151	2.089	1.648	—	1.148
2400	1.225	1.142	1.156	2.100	1.666	—	1.154
2500	1.232	1.147	1.161	2.110	1.682	—	1.159
2600	1.238	—	—	—	1.698	—	—
2700	1.244	—	—	—	1.714	—	—
2800	—	—	—	—	1.729	—	—
2900	—	—	—	—	1.743	—	—
3000	—	—	—	—	—	—	—

当温度变化范围不大时，可采用平均比热的直线关系式计算比热和热量，其结果较之定值比热有较高的精确度，可以满足工程上的要求。

理想气体的比热与温度之间的函数关系可用下式表示为

$$C=a+bt+et^2+\cdots \tag{1.1.4-44}$$

若取上式右边的前两项，即可得到真实比热的直线关系式

$$C=a+bt \tag{1.1.4-45}$$

式中，a、b、e 等是与气体性质有关的常数。

表 1.1.4-12 列出了平均比热的直线关系式。当求从t_1到t_2间的平均比热时，其关系式为

$$C_m\Big|_{t_1}^{t_2}=a+\frac{b}{2}(t_1+t_2) \tag{1.1.4-46}$$

即只需将(t_1+t_2)代入关系式中的 t 即可。当求从 0 ℃到某一温度 t 间的平均比热，其关系式为

$$C_m\Big|_{t_1}^{t_2}=a+\frac{b}{2}t \tag{1.1.4-47}$$

表 1.1.4-12

气体的平均比热(直线关系式)

(适用范围：0～1500℃)

	质量比热kJ/(kg·K)	容积比热kJ/(Nm³·K)
O_2	$c_p=0.9203+0.00010651t$ $c_v=0.6603+0.00010641t$	$c'_p=1.3138+0.00015767t$ $c'_v=0.9429+0.00015767t$
N_2	$c_p=1.0241+0.00008855t$ $c_v=0.7272+0.00008855t$	$c'_p=1.2799+0.00011066t$ $c'_v=0.9090+0.00011066t$
CO	$c_p=1.0304+0.00009692t$ $c_v=0.7331+0.00009692t$	$c'_p=1.2870+0.00012104t$ $c'_v=0.9161+0.00012104t$
空气	$c_p=0.9956+0.00009299t$ $c_v=0.7088+0.00009299t$	$c'_p=1.2866+0.00012012t$ $c'_v=0.9157+0.00012012t$
H_2O	$c_p=1.8334+0.00031108t$ $c_v=1.3716+0.00031108t$	$c'_p=1.4733+0.00024988t$ $c'_v=1.1024+0.00024983t$
CO_2	$c_p=0.8725+0.00024062t$ $c_v=0.6837+0.00024062t$	$c'_p=1.7132+0.00004723t$ $c'_v=1.3423+0.00004723t$
H_2	$c_p=14.2494+0.00059574t$ $c_v=10.1241+0.00059574t$	$c'_p=1.2795+0.00005355t$ $c'_v=0.9094+0.00005355t$

例：一锅炉的空气预热器在等压下将空气从 20℃加热到 200℃，空气流量（标准状态）为 4000 Nm³/h，试用定值比热、比热的直线关系式及比热的曲线关系式分别计算每小时加给空气的热量。

解：（1）用定值比热计算

设空气为双原子气体，其等压容积比热可查表 1.1.4-4，并按式(1.1.4-41)得

$$C'_p=\frac{\mu C_p}{22.4}=\frac{7\times4.1868}{22.4}=1.308\ \mathrm{kJ/(Nm^3\cdot K)}$$

加给空气的热量为

$$Q=V_0\cdot C'_p(t_2-t_1)$$
$$=4000\times1.308(200-20)=941760\ \mathrm{kJ/h}$$

$$=261.6\ \mathrm{kJ/s}$$
$$=261.6\ \mathrm{kW}$$

（2）用平均比热（直线关系）计算

查表 1.1.4 得空气的等压容积比热式为

$$C'_{pm}=1.2866+0.00012012t \quad \mathrm{kJ/(Nm^3\cdot K)}$$

$$C'_{pm}\Big|_{20}^{200}=1.2866+0.00012012(200+20)$$
$$=1.313\ \mathrm{kJ/(Nm^3\cdot K)}$$

加给空气的热量为

$$Q=4000\times1.313\times(200-20)=945360\ \mathrm{kJ/h}$$
$$=262.6\ \mathrm{kJ/s}$$
$$=262.6\ \mathrm{kW}$$

（3）用平均比热（曲线关系）计算

查表 1.1.4-10，当 $t_1=20℃$ 时

$$C'_{pm}\Big|_{0}^{20}=1.297+\frac{1.300-1.297}{100}\times20=1.298\ \mathrm{kJ(Nm^3\cdot K)}$$

当 $t_2=200℃$ 时

$$C'_{pm}\Big|_{0}^{200}=1.297+\frac{1.307-1.297}{200}\times200=1.307\ \mathrm{kJ/(Nm^3\cdot K)}$$

故加给空气的热量为

$$Q=V_0\left[C'_{pm}\Big|_{0}^{t_2}\times t_2-C'_{pm}\Big|_{0}^{t_1}\times t_1\right]$$
$$=4000\ (1.307\times200-1.298\times20)$$
$$=941859\ \mathrm{kJ/h}$$
$$=261.63\ \mathrm{kJ/s}$$
$$=261.63\ \mathrm{kW}。$$

4.3 理想气体的内能、焓和熵

理想气体的内能和焓都只是绝对温度的单值函数。因此，只要理想气体的温度变化范围相同，不论经过任何过程，其内能和焓的变化量都可按下列公式计算，即

理想气体的内能

$$\Delta u_{12}=C_v(t_2-t_1)=C_{vm}\Big|_{t_1}^{t_2}\ (t_2-t_1) \tag{1.1.4-48}$$

对微元过程

$$du=C_v dt=C_v dT \tag{1.1.4-49}$$

理想气体的焓

$$\Delta h_{12}=C_p(t_2-t_1)=C_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2-t_1) \tag{1.1.4-50}$$

对微元过程

$$dh=C_p dt=C_p dT \tag{1.1.4-51}$$

理想气体比熵差的计算

在温度变化范围不大时，比热 C_v、C_p 可近似作为定值，则计算比熵差的近似式为

$$\Delta s_{12}=C_{\mathrm{v}}\ln\frac{T_2}{T_1}+R\ln\frac{v_2}{v_1} \tag{1.1.4-52}$$

$$\Delta s_{12}=C_{\mathrm{p}}\ln\frac{T_2}{T_1}-R\ln\frac{p_2}{p_1} \tag{1.1.4-53}$$

$$\Delta s_{12}=C_{\mathrm{v}}\ln\frac{p_2}{p_1}+C_{\mathrm{p}}\ln\frac{v_2}{v_1} \tag{1.1.4-54}$$

关于理想气体内能和焓的绝对值，通常是按人为地规定某一状态下的内能值(或焓值)为零，一般取 0 K或 0 ℃时的内能值(或焓值)为零，则任意温度时的内能值u(或焓值h)实质上是从 0 K或 0 ℃计起的相对值，即

$$h=C_{\mathrm{pm0}}^{\mathrm{t}}T \tag{1.1.4-55}$$

$$u=C_{\mathrm{vm0}}^{\mathrm{t}}T \tag{1.1.4-56}$$

或

$$h=C_{\mathrm{pm0}}^{\mathrm{t}}t \tag{1.1.4-57}$$

$$u=C_{\mathrm{vm0}}^{\mathrm{t}}t \tag{1.1.4-58}$$

熵的绝对值，一般规定气体在标准状态下熵值为零，则任意一状态下的熵值为：

$$s=C_{\mathrm{v}}\ln\frac{T}{273}+R\ln\frac{\mu v}{22.4} \tag{1.1.4-59}$$

$$s=C_{\mathrm{p}}\ln\frac{T}{273}-R\ln\frac{p}{101325} \tag{1.1.4-60}$$

$$s=C_{\mathrm{v}}\ln\frac{p}{101325}+C_{\mathrm{p}}\ln\frac{\mu v}{22.4} \tag{1.1.4-61}$$

表 1.1.4-13 到 1.1.4-21 列出了有关气体的性质。

表 1.1.4-13　　**空气的热力性质表**

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；$t_0=0$℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6463.5	4608.2	185.564	0.4931	420	20448.5	14685.5	219.080	27.77
−40	6753.8	4815.4	186.837	0.5747	440	21071.4	15142.1	219.966	30.90
−30	7044.2	5022.6	188.056	0.6655	460	21697.0	15601.4	220.831	30.29
−20	7334.5	5229.8	189.227	0.7661	480	22325.4	16063.6	221.677	37.96
−10	7624.9	5437.0	190.352	0.8771	500	22956.6	16528.5	222.504	41.93
0	7915.4	5644.4	191.435	0.9992	550	24546.7	17702.9	224.497	53.28
20	8496.6	6059.3	193.489	1.2791	600	26153.6	18894.0	226.392	66.93
40	9079.3	6474.7	195.408	1.6113	650	27776.6	20101.3	228.199	83.18
60	9660.8	6890.9	197.211	2.001	700	29414.8	21323.8	229.927	102.40
80	10244.1	7308.0	198.912	2.455	750	31067.4	22560.8	231.583	124.97
100	10828.6	7726.2	200.522	2.980	800	32733.5	23811.1	233.173	151.30
120	11414.4	8145.7	202.051	3.582	850	34412.0	25074.0	234.702	181.81
140	12001.6	8566.6	203.508	4.268	900	36102.2	26348.4	236.174	217.0
160	12590.4	8989.1	204.899	5.046	950	37803.2	27633.7	237.594	257.5
180	13181.1	9413.5	206.232	5.923	1000	39514.3	28929.1	238.965	303.6
200	13773.6	9839.7	207.512	6.909	1050	41234.8	30233.9	240.290	356.1
220	14368.2	10268.0	208.743	8.011	1100	42964.2	31547.5	241.573	415.5
240	14964.0	10698.5	209.929	9.240	1150	44702.0	32869.6	242.816	482.5
260	15564.0	11131.3	211.074	10.605	1200	46447.8	34199.7	244.022	557.8
280	16165.4	11566.4	212.182	12.195	1250	48201.1	35537.3	245.192	642.2
300	16769.3	12004.0	213.254	13.784	1300	49961.7	36882.2	246.330	736.3

续上表

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
320	17375.8	12444.2	214.294	15.621	1350	51729.2	38234.0	247.436	841.1
340	17984.9	12887.1	215.304	17.638	1400	53503.1	39592.2	248.512	957.4
360	18596.7	13332.6	216.286	19.849	1450	55283.0	40956.4	249.560	1086.0
380	19211.2	13780.8	217.241	22.26	1500	57068.7	42326.4	250.582	1228.0
400	19828.5	14231.8	218.172	24.90					

表 1.1.4-14　　**氮的热力性质表**

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；$t_0=0$℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6481.1	4625.8	183.068	0.3652	600	260.261	18766.5	223.677	48.28
0	7936.4	5665.3	188.952	0.7412	700	29251.0	21160.0	227.173	73.52
50	9391.9	6705.2	193.846	1.3353	800	32535.7	23613.3	230.385	108.20
100	10849.5	7747.1	198.040	2.211	900	35873.2	26119.4	233.359	154.72
150	12311.6	8793.5	201.717	3.441	1000	39257.0	28671.8	236.127	215.8
200	13780.9	9847.0	204.998	5.106	1100	42681.7	31265.1	238.716	294.7
250	15259.8	10910.2	207.969	7.300	1200	46142.8	33894.7	241.149	394.8
300	16750.8	11985.5	210.691	10.127	1300	49636.1	36556.6	243.443	520.3
400	19776.1	14179.4	215.555	18.179	1400	53157.3	39246.4	245.613	675.5
500	22866.9	16438.8	219.835	30.41	1500	56702.5	41960.2	247.671	865.2

表 1.1.4-15　　**大气氮的热力性质表**

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；$t_0=0$℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6470.4	4615.0	182.665	0.3479	600	25948.0	18688.5	223.136	45.24
0	7920.8	5649.7	188.530	0.7045	700	29160.2	21069.2	226.618	68.78
50	9371.5	6684.8	193.407	1.2666	800	32431.3	23508.9	229.818	101.06
100	10824.4	7722.0	197.587	2.094	900	35754.6	26000.8	232.778	144.28
150	12281.7	8763.6	201.252	3.254	1000	39123.7	28538.5	235.534	200.99
200	13746.1	9812.2	204.523	4.822	1100	42533.3	31116.2	238.112	274.05
250	15220.1	10870.6	207.484	6.886	1200	45978.8	33730.8	240.534	366.72
300	16706.1	11940.8	210.197	9.543	1300	49456.2	36376.8	242.817	482.65
400	19721.0	14124.3	215.044	17.095	1400	52961.2	39050.3	244.977	625.83
500	22800.8	16372.6	219.309	28.55	1500	56490.2	41747.9	247.026	800.68

表 1.1.4-16　　**氧的热力性质表**

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；$t_0=0$℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6469.8	4614.5	196.600	1.859	600	26977.7	19718.2	238.797	297.59
0	7928.1	5657.1	202.496	3.779	700	30426.4	22335.2	242.536	466.57
50	9395.1	6708.4	207.428	6.839	800	33924.0	25001.6	245.957	704.0
100	10878.3	7775.8	211.694	11.426	900	37462.8	27709.0	249.109	1028.7
150	12382.4	8864.3	215.477	18.008	1000	41037.7	30452.5	252.033	1462.2
200	13910.4	9976.6	218.889	27.14	1100	44644.8	33228.2	254.761	2029.9
250	15463.6	11114.1	222.009	39.51	1200	48280.5	36032.5	257.316	2760.5
300	17042.2	12276.9	224.891	55.87	1300	51941.5	38862.0	259.721	3686.1
400	20271.9	14675.2	230.083	104.33	1400	55625.2	41714.3	261.991	4843.5
500	23588.4	17160.3	234.675	181.26	1500	59333.1	44590.8	264.143	6274.6

表 1.1.4-17 二氧化碳的热力性质表

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；t_0=0℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6716.0	4860.7	203.420	0.04224	600	35990.9	28731.4	261.901	47.914
0	8453.7	6182.6	210.437	0.09823	700	41328.3	33237.3	267.687	96.09
50	10310.5	7623.8	216.675	0.2080	800	46791.7	37869.3	273.030	182.72
100	12274.5	9172.0	222.322	0.4102	900	52361.9	42608.1	277.992	331.89
150	14335.0	10816.8	227.502	0.7649	1000	58023.3	47438.7	282.623	579.2
200	16482.9	12549.0	232.298	1.3618	1100	63763.6	52347.0	286.963	976.3
250	18710.0	14360.4	236.771	2.3323	1200	69571.9	57323.8	291.046	1595.3
300	21009.1	16243.8	240.967	3.8635	1300	75438.4	62358.9	294.898	2535.7
400	25797.7	20201.0	248.663	9.749	1400	81354.5	67443.5	298.544	3931.3
500	30804.0	24375.9	255.594	22.439	1500	87314.4	72572.1	302.004	5960.1

表 1.1.4-18 一氧化碳的热力性质表

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；t_0=0℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6487.3	4632.0	189.467	0.7886	600	26198.1	18938.5	230.333	107.52
0	7942.4	5671.3	195.351	1.6003	700	29471.5	21380.6	232.882	164.77
50	9398.2	6711.5	200.145	2.883	800	32803.9	23881.5	237.141	243.85
100	10857.9	7755.6	204.445	4.778	900	36187.1	26433.3	240.155	350.39
150	12324.7	8806.5	208.134	7.446	1000	39614.2	29028.9	242.958	490.89
200	13801.6	9867.8	211.433	11.072	1100	43079.6	31663.0	245.578	672.7
250	15291.5	10941.9	214.426	15.870	1200	46578.8	34330.8	248.038	904.3
300	16796.3	12031.0	217.173	22.083	1300	50107.4	37028.0	250.355	1195.0
400	19857.4	14260.6	222.094	39.914	1400	53661.0	39750.1	252.545	1555.1
500	22991.5	16563.4	226.434	67.27	1500	57236.3	42494.0	254.621	1996.0

表 1.1.4-19 水蒸汽(理想气体状态)的热力性质表

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；t_0=0℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	7384.5	5529.2	179.005	0.2240	600	30773.5	23514.0	227.140	73.23
0	9058.4	6787.4	185.773	0.5057	700	34806.1	26715.1	231.511	123.89
50	10738.2	8051.4	191.420	0.9973	800	38966.0	30043.6	235.579	202.09
100	12431.8	9329.4	196.292	1.7922	900	43251.4	33497.6	239.397	319.85
150	14144.6	10626.4	200.599	3.008	1000	47658.8	37073.6	243.001	493.45
200	15879.8	11945.9	204.475	4.795	1100	52182.6	40765.3	246.421	744.5
250	17640.1	13290.5	208.011	7.336	1200	56815.5	44567.5	249.678	1101.5
300	19427.3	14662.0	211.273	10.862	1300	61549.5	48470.0	252.787	1600.9
400	23087.4	17490.7	217.157	22.04	1400	66376.1	52465.0	255.761	2289.4
500	26868.0	20439.9	222.391	41.36	1500	71288.3	56546.0	258.612	3226.0

表 1.1.4-20 **氢的热力性质表**

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；t_0=0℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	6336.3	4481.0	122.365	2.4646	600	25331.8	18072.3	162.037	291.11
0	7749.7	5478.6	128.077	4.8996	700	28327.2	20236.3	165.285	430.23
50	9188.7	6502.0	132.915	8.766	800	31356.7	22434.3	168.248	614.4
100	10640.6	7538.1	137.092	14.488	900	34424.2	24670.4	170.981	853.5
150	12098.5	8580.4	140.758	22.518	1000	37532.7	26947.5	173.523	1158.8
200	13559.4	9625.6	144.021	33.342	1100	40683.7	29267.1	175.906	1543.3
250	15021.8	10672.2	146.959	47.475	1200	43877.9	31629.8	178.151	2021.8
300	16485.5	11720.2	149.632	65.47	1300	47115.3	34035.8	180.277	2611.0
400	19418.4	13821.7	154.348	115.45	1400	50395.6	36484.6	182.298	3329.6
500	22364.6	15936.5	158.428	188.60	1500	53717.6	38975.2	184.227	4198.7

表 1.1.4-21 **氩的热力性质表**

表中：t,℃；H、U、E,kJ/kmol；S°，kJ/(kmol·K)；t_0=0℃，$p_0=10^5$Pa

t	H	U	S°	π°	t	H	U	S°	π°
−50	4855.7	3000.4	106.265	3.554	600	18366.6	11107.1	134.623	107.66
0	5895.0	3624.0	110.468	5.892	700	20445.2	12354.3	136.877	141.18
50	6934.3	4247.6	113.962	8.790	800	22523.8	13601.5	138.910	180.30
100	7973.6	4871.2	116.952	12.853	900	24602.4	14848.6	140.762	225.28
150	9012.9	5494.8	119.566	17.602	1000	26681.0	16095.8	142.462	276.41
200	10052.2	6118.4	121.888	23.271	1100	28759.6	17343.0	144.034	333.92
250	11091.5	6742.0	123.976	29.915	1200	30838.2	18590.2	145.495	398.08
300	12130.8	7365.6	125.873	37.584	1300	32916.8	19837.4	146.860	469.12
400	14209.4	8612.7	129.216	56.18	1400	34995.4	21084.5	148.141	547.27
500	16288.0	9859.9	132.095	79.43	1500	37074.0	22331.7	149.348	632.74

表 1.1.4-13～表 1.1.4-21 引自РИВКИН С.Л.《Термодинамические Своиства Газов》 М.“Энергия” 1973.

表中：π°——相对压力比。

例：设有 5 千克的氮气，经历一状态变化过程后，压力提高了一倍，容积减少为一半，求其熵的变化量。设氮气为理想气体，且比热按定值计算。

解：1 千克理想气体，定值比热时的熵变量可引用式(1.1.4-54)

$$\Delta s_{1-2}=C_V\ln\frac{p_2}{p_1}+C_p\ln\frac{v_2}{v_1}$$

进行计算。

因N_2是双原子气体，千摩尔质量$\mu=28$，所以比热近似为

$$C_V=\frac{\mu C_V}{\mu}=\frac{5\times4.1868}{28}=0.748\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$C_p=\frac{\mu C_p}{\mu}=\frac{7\times4.1868}{28}=1.047\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

已知：$\frac{p_2}{p_1}=2$；$\frac{v_2}{v_1}=\frac{V_2/m}{V_1/m}=\frac{1}{2}$，

$$\therefore\quad \Delta s_{1-2}=0.748\ln 2+1.047\ln\frac{1}{2}=-0.207\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S_{1-2}=m\Delta s_{1-2}=5\times(-0.207)=-1.035\ \text{kJ/K}$$

4.4 理想混合气体

由多种互相不起化学反应的理想气体所组成的气体，称为理想混合气体，如空气、烟气及燃气等。

1）分压力和分容积

混合气体中第i种组成气体单独占有与混合气体相同的容积，处于与混合气体相同的温度时所具有的压力，称为该组成气体的分压力。理想混合气体的压力等于各组成气体分压力之和，即

$$p=\sum_{i=1}^{n}p_i \tag{1.1.4-62}$$

此即是道尔顿定律。

混合气体中第i种组成气体处于与混合气体相同的温度和压力时，单独占有的容积称为分容积。理想混合气体的容积等于各组成气体分容积之和，即

$$V=\sum_{i=1}^{n}V_i \tag{1.1.4-63}$$

此即是分容积定律。

2）混合气体的成分

质量成分g_i

混合气体中第i种组成气体的质量m_i占混合气体总质量m的百分数，称为相对质量或质量成分，即

$$g_i=\frac{m_i}{m} \tag{1.1.4-64}$$

且

$$\sum_{i=1}^{n}g_i=1 \tag{1.1.4-65}$$

容积成分r_i

$$r_i=\frac{V_i}{V} \tag{1.1.4-66}$$

且

$$\sum_{i=1}^{n}r_i=1 \tag{1.1.4-67}$$

千摩尔成分x_i

$$x_i=\frac{n_i}{n} \tag{1.1.4-68}$$

且

$$\sum_{i=1}^{n}x_i=1 \tag{1.1.4-69}$$

式中：n_i——i种组成气体的千摩尔数；

n——混合气体的千摩尔数，$n=\sum_{i=1}^{n}n_i$。

3）折合分子量和气体常数

混合气体的总质量m与其总千摩尔数之比值也就相当于分子量，称为混合气体的折合分子量，用μ_{eq}表示，即

$$\mu_{eq}=\frac{m}{n} \tag{1.1.4-70}$$

式中：$m=\sum_{i=1}^{n}m_i=\sum_{i=1}^{n}n_i\mu_i$，其中$\mu_i$为第$i$种组成气体的分子量。

因此，

$$\mu_{eq}=\frac{\sum_{i=1}^{n}n_i\mu_i}{n}=\sum_{i=1}^{n}x_i\mu_i \qquad (1.1.4\text{-}71)$$

混合气体的气体常数

$$R_{mix}=\frac{8314.3}{\mu_{eq}}=\frac{8314.3}{\sum_{i=1}^{n}x_i\mu_i}\ \text{J/(kg·K)} \qquad (1.1.4\text{-}72)$$

4）各成分之间的换算关系

已知容积成分，换算为质量成分，即

$$g_i=\frac{m_i}{m}=\frac{\mu_i n_i}{\mu_{eq}n}=\frac{\mu_i}{\mu_{eq}}r_i=\frac{r_i\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}r_i\mu_i} \qquad (1.1.4\text{-}73)$$

已知质量成分，换算为容积成分，即

$$r_i=x_i=\frac{n_i}{n}=\frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{m_i}{\mu_i}} \qquad (1.1.4\text{-}74)$$

上式分子、分母均除以m得

$$r_i=\frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{g_i}{\mu_i}} \qquad (1.1.4\text{-}75)$$

5）混合气体的比热

质量比热

$$C=\sum_{i=1}^{n}g_iC_i \qquad (1.1.4\text{-}76)$$

式中：C_i——第i种组成气体的质量比热。

容积比热

$$C'=\sum_{i=1}^{n}r_iC'_i \qquad (1.1.4\text{-}77)$$

式中：C'_i——第i种组成气体的容积比热。

6）混合气体的内能、焓和熵

比内能

$$u=\frac{U}{m}=\frac{\sum_{i=1}^{n}m_iu_i}{m}=\sum_{i=1}^{n}x_iu_i \qquad (1.1.4\text{-}78)$$

式中：u_i——第i种组成气体的比内能；

U——m千克质量混合气体的内能；

u——1千克混合气体的比内能。

比焓

$$h=\sum_{i=1}^{n}x_ih_i \qquad (1.1.4\text{-}79)$$

式中：h_i——第i种组成气体的比焓。

比熵

混合气体的熵也等于各组成气体熵的总和，即

$$s=\sum_{i=1}^{n}s_i \tag{1.1.4-80}$$

称为吉布斯定律。对1千克混合气体有

$$s=\sum_{i=1}^{n}s_i \tag{1.1.4-81}$$

式中：s_i——第i种组成气体的比熵。

5 水蒸汽及其热力性质

水蒸汽是目前蒸汽动力装置的主要工质，其临界温度较高，离液体状态不远，为一种实际气体。

5.1 基本名词、定义

1)汽化　由液态变成气态的过程。

2)蒸发　液体表面的汽化过程。

3)沸腾　液体内部的汽化过程。

4)饱和状态　液体和蒸汽处于热动平衡的状态，相应的压力和温度分别称为饱和压力和饱和温度，两者对应成单值函数$p_s=f(t_s)$。

5)未饱和水(过冷水)　水温t低于所处压力p下的饱和温度t_s，这种水称为未饱和水。(t_s-t)称为过冷度。

图 1.1.4-12　水蒸汽的p-v图

图 1.1.4-13　水蒸汽的T-s图

6)饱和水　水温t等于所处压力p的饱和温度t_s，这种水称为饱和水。

7)湿蒸汽　饱和状态下的汽、水混合物，称为湿蒸汽。湿蒸汽的成分用干度x表示，即

$$x=\frac{\text{干饱和蒸汽的质量}}{\text{湿蒸汽的总质量}} \tag{1.1.4-82}$$

饱和水的干度$x=0$，湿蒸汽的干度$0<x<1$。

8)干饱和蒸汽　干度$x=1$的饱和蒸汽称为干饱和蒸汽。

9)过热蒸汽　温度t高于所处压力p下的饱和温度t_s的蒸汽称为过热蒸汽。$(t-t_s)$称为过热度。

10)比汽化潜热　使1千克质量饱和水蒸发为同压力下1千克干饱和蒸汽所需要的热量，称为比汽化潜热。

5.2　水蒸汽的p-v图和T-s图

工业用水蒸汽都是由锅炉产生的，可以看作为连续的等压加热过程。图1.1.4-12和图1.1.4-13分别为水蒸汽的p-v图和T-s图。

从上述两图中，可将水蒸汽发生过程及有关性质归纳如下：

1) 5种状态

未饱和水（点a）、饱和水（点b）、湿蒸汽（湿饱和区内任意点c）、干饱和蒸汽（点d）和过热蒸汽（过热区内任意点e）等5种状态。

2)三个过程

从0℃时的未饱和水定压加热至饱和水状态的过程（$a-b$）。吸收的热量称为液体热q'，即

$$q'=c_p(t_s-t_0)=h'-h_0 \tag{1.1.4-83}$$

从饱和水定压加热至干饱和蒸汽的过程（$b-c-d$）。吸收的热量称为汽化潜热r，即

$$r=T_s(s''-s')=h''-h' \tag{1.1.4-84}$$

从干饱和蒸汽定压加热至过热蒸汽的过程（$d-e$）。吸收的热量称为过热热量q''，即

$$q''=\bar{c}_p(t-t_s)=h-h'' \tag{1.1.4-85}$$

因此，从未饱和水定压加热至过热蒸汽状态所吸收的总热量为：

$$q=q'+r+q''=h-h_0 \tag{1.1.4-86}$$

3)两条曲线

饱和水线cA_1：连接不同压力下的饱和水状态点所联成的曲线称为饱和水线，或称下界限线。

干饱和蒸汽线CA_2：连接不同压力下的干饱和蒸汽状态点所联成的曲线称为干饱和蒸汽线，或称为上界限线。

4)三个区域：

下界限线CA_1的左侧为未饱和水（或过冷水）区；

上界限线CA_2的右侧为过热蒸汽区；

两界限线之间为饱和水、汽共存的湿蒸汽区。

5)两个点：

三相点　为固、液、汽三态共存的状态点。图1.1.4-14为水的P-t图，图中A为三相点。三相点的参数随不同物质而异，对于水，三相点的参数为

$$T_A=273.16\,\text{K}=0.01℃;$$

$p_A = 0.0006112\ \text{MPa} = 4.58\ \text{mmHg}$;

$v_A = 0.00100022\ \text{m}^3/\text{kg}$。

临界点　为下界限线 cA_1 和上界限线 cA_2 相汇合的点。在临界点下，饱和水和饱和蒸汽已无区别了。

水的临界参数：

$T_c = 647.3\ \text{K} = 374.15℃$；

$p_c = 22.12\ \text{MPa}$；

$v_c = 0.00317\text{m}^3/\text{kg}$。

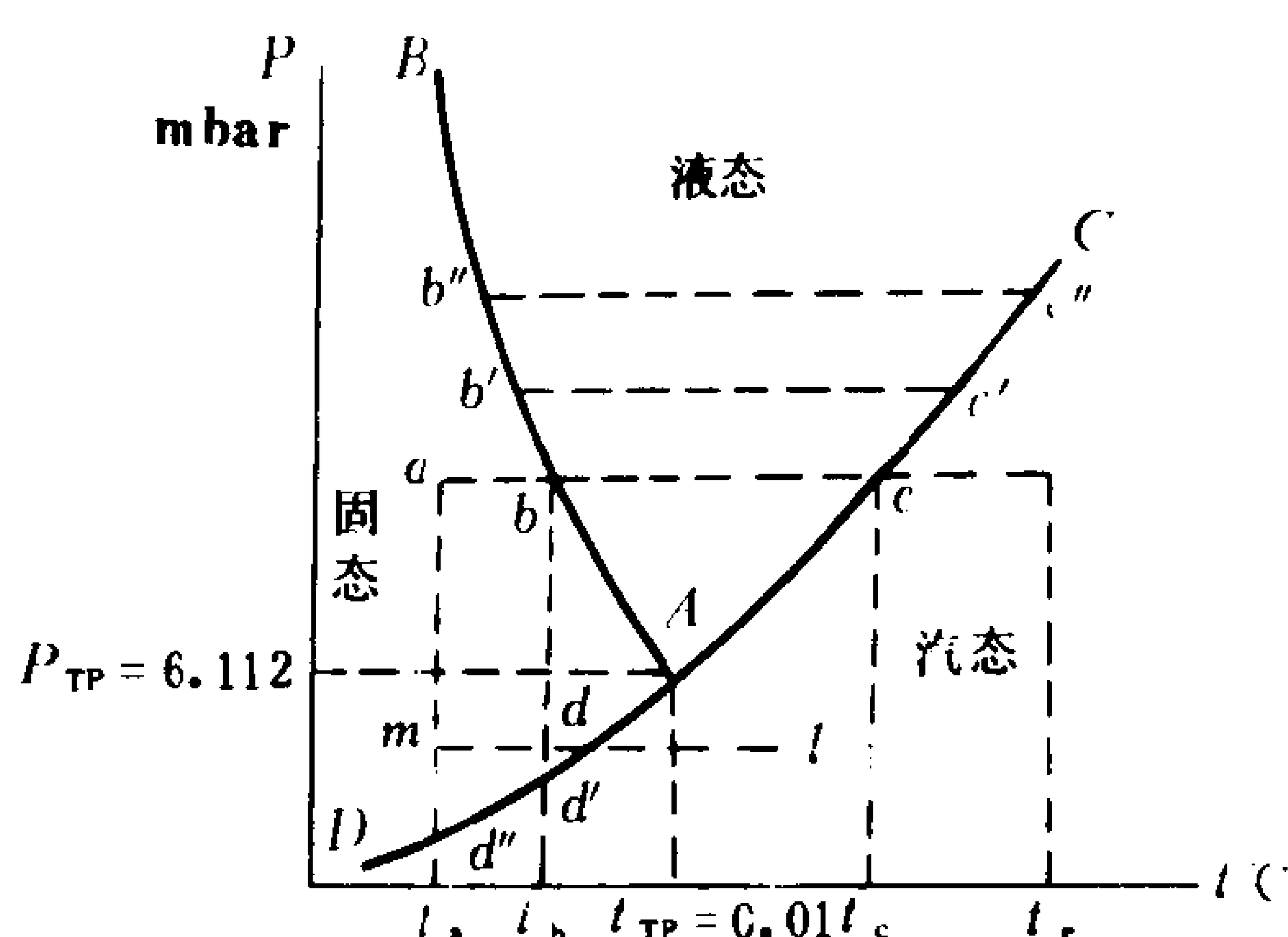


图 1.1.4-14　水三相点图

5.3　水蒸汽的热力性质图表

在热工计算中，都是采用水蒸汽的热力性质图表，即水蒸汽表和焓熵（h-s）图。

1)水蒸汽表

水蒸汽表分两种：一是饱和水与饱和蒸汽表，其中又分以温度为序列如表 1.1.4-22 和以压力为序列如表 1.1.4-23；一是未饱和水与过热蒸汽表，如表 1.1.4-24。

在饱和水与饱和蒸汽表中的各参数值，“ ′”表示干度 $x=0$的饱和水线上的各参数值，“ ″”表示干度 $x=1$的干饱和蒸汽线上的各参数值。

水蒸汽的比内能用下式计算

$$u = h + pv$$

湿蒸汽的各参数值按下列公式计算

$$v_x = (1-x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v') \quad (1.1.4\text{-}87)$$

$$h_x = (1-x)h' + xh'' = h' + x(h'' - h') \quad (1.1.4\text{-}88)$$

$$s_x = (1-x)s' + xs'' = s' + x(s'' - s') \quad (1.1.4\text{-}89)$$

$$u_x = (1-x)u' + xu'' = u' + x(u'' - u') \quad (1.1.4\text{-}90)$$

表 1.1.4-22①　**饱和水与饱和蒸汽表（按温度排列）**

温　度	压　力	比容 液　体	比容 蒸　汽	焓 液　体	焓 蒸　汽	汽化潜热	熵 液　体	熵 蒸　汽
t	p	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
℃	10^5Pa	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{(\text{kg}\cdot\text{K})}$	$\frac{\text{kJ}}{(\text{kg}\cdot\text{K})}$
0	0.006108	0.0010002	206.321	−0.04	2501.0	2501.0	−0.0002	9.1565
0.01	0.006112	0.00100022	206.175	0.000614	2501.0	2501.0	0.0000	9.1562
1	0.006566	0.0010001	192.611	4.17	2502.8	2498.6	0.0152	9.1298
2	0.007054	0.0010001	179.935	8.39	2504.7	2496.3	0.0306	9.1035
3	0.007575	0.0010000	168.165	12.60	2506.5	2493.9	0.0459	9.0773
4	0.008129	0.0010000	157.267	16.80	2508.3	2491.5	0.0611	9.0514

① 该表引自 С.Л.Ривкин, А.А.Александров, 《Термодинамические свойства воды и водяното пара》, 1975。

续上表

温度	压力	比容		焓		汽化潜热	熵	
		液体	蒸汽	液体	蒸汽		液体	蒸汽
t	p	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
℃	10^5Pa	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{(kg \cdot K)}$	$\frac{kJ}{(kg \cdot K)}$
5	0.008718	0.0010000	147.167	21.01	2510.2	2489.2	0.0762	9.0258
6	0.009346	0.0010000	137.768	25.21	2512.0	2486.8	0.0913	9.0003
7	0.010012	0.0010001	129.061	29.41	2513.9	2484.5	0.1063	8.9751
8	0.010721	0.0010001	120.952	33.60	2515.7	2482.1	0.1213	8.9501
9	0.011473	0.0010002	113.423	37.80	2517.5	2479.7	0.1362	8.9254
10	0.012271	0.0010003	106.419	41.99	2519.4	2477.4	0.1510	8.9009
11	0.013118	0.0010003	99.896	46.19	2521.2	2475.0	0.1658	8.8766
12	0.014015	0.0010004	93.828	50.38	2523.0	2472.6	0.1805	8.8525
13	0.014967	0.0010006	88.165	54.57	2524.9	2470.2	0.1952	8.8286
14	0.015974	0.0010007	82.893	58.75	2526.7	2467.9	0.2098	8.8050
15	0.017041	0.0010008	77.970	62.94	2528.6	2465.7	0.2243	8.7815
16	0.018170	0.0010010	73.376	67.13	2530.4	2463.3	0.2388	8.7583
17	0.019364	0.0010012	69.087	71.31	2532.2	2460.9	0.2533	8.7353
18	0.020626	0.0010013	65.080	75.50	2534.0	2458.5	0.2677	8.7125
19	0.021960	0.0010015	61.334	79.68	2535.9	2456.2	0.2820	8.6898
20	0.023368	0.0010017	57.833	83.86	2537.7	2453.8	0.2963	8.6674
22	0.026424	0.0010022	51.488	92.22	2541.4	2449.2	0.3247	8.6232
24	0.029824	0.0010026	45.923	100.59	2545.0	2444.4	0.3530	8.5797
26	0.033600	0.0010032	41.031	108.95	2548.6	2439.6	0.3810	8.5370
28	0.037785	0.0010037	36.726	117.31	2552.3	2435.0	0.4088	8.4950
30	0.042417	0.0010043	32.929	125.66	2555.9	2430.2	0.4365	8.4537
35	0.056217	0.0010060	25.246	146.56	2565.0	2418.4	0.5049	8.3536
40	0.073749	0.0010078	19.548	167.45	2574.0	2406.5	0.5721	8.2576
45	0.095817	0.0010099	15.278	188.35	2582.9	2394.5	0.6383	8.1655
50	0.12335	0.0010121	12.048	209.26	2591.8	2382.5	0.7035	8.0771
55	0.15740	0.0010145	9.5812	230.17	2600.7	2370.5	0.7677	7.9922
60	0.19919	0.0010171	7.6807	251.09	2609.5	2358.4	0.8310	7.9106
65	0.25008	0.0010199	6.2042	272.02	2618.2	2346.2	0.8933	7.8320
70	0.31161	0.0010228	5.0479	292.97	2626.8	2333.8	0.9548	7.7565
75	0.38548	0.0010259	4.1356	313.94	2635.3	2321.4	1.0154	7.6837
80	0.47359	0.0010292	3.4104	334.92	2643.8	2308.9	1.0752	7.6135
85	0.57803	0.0010326	2.8300	355.92	2652.1	2296.2	1.1343	7.5459
90	0.70108	0.0010361	2.3624	376.94	2660.3	2283.4	1.1925	7.4805
95	0.84525	0.0010398	1.9832	397.99	2668.4	2270.4	1.2500	7.4174
100	1.01325	0.0010437	1.6738	419.06	2676.3	2257.2	1.3069	7.3564
110	1.4326	0.0010519	1.2106	461.32	2691.8	2230.5	1.4185	7.2402
120	1.9854	0.0010606	0.89202	503.7	2706.6	2202.9	1.5276	7.1310
130	2.7012	0.0010700	0.66851	546.3	2720.7	2174.4	1.6344	7.0281

续上表

温度	压力	比容		焓		汽化	熵	
		液体	蒸汽	液体	蒸汽	潜热	液体	蒸汽
t	p	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
℃	10^5Pa	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	$\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$
140	3.6136	0.0010801	0.50875	589.1	2734.0	2144.9	1.7390	6.9307
150	4.7597	0.0010908	0.39261	632.2	2746.3	2114.1	1.8416	6.8381
160	6.1804	0.0011022	0.30685	675.5	2757.7	2082.2	1.9425	6.7498
170	7.9202	0.0011145	0.24259	719.1	2768.0	2048.9	2.0416	6.6652
180	10.027	0.0011275	0.19381	763.1	2777.1	2014.0	2.1393	6.5838
190	12.552	0.0011415	0.15631	807.5	2784.9	1977.4	2.2356	6.5052
200	15.551	0.0011565	0.12714	852.4	2791.4	1939.0	2.3307	6.4289
210	19.079	0.0011726	0.10422	897.8	2796.4	1898.6	2.4247	6.3546
220	23.201	0.0011900	0.08602	943.7	2799.9	1856.2	2.5178	6.2819
230	27.979	0.0012087	0.07143	990.3	2801.7	1811.4	2.6102	6.2104
240	33.480	0.0012291	0.05964	1037.6	2801.6	1764.0	2.7021	6.1397
250	39.776	0.0012513	0.05002	1085.8	2799.5	1713.7	2.7936	6.0693
260	46.940	0.0012756	0.04212	1135.0	2795.2	1660.2	2.8850	5.9989
270	55.051	0.0013025	0.03557	1185.4	2788.3	1602.9	2.9766	5.9278
280	64.191	0.0013324	0.03010	1237.0	2778.6	1541.6	3.0687	5.8555
290	74.448	0.0013659	0.02551	1290.3	2765.4	1475.1	3.1616	5.7811
300	85.917	0.0014041	0.02162	1345.4	2748.4	1403.0	3.2559	5.7038
310	98.697	0.0014480	0.01829	1402.9	2726.8	1323.9	3.3522	5.6224
320	112.90	0.0014995	0.01544	1463.4	2699.6	1236.2	3.4513	5.5356
330	128.65	0.0015614	0.01296	1527.5	2665.5	1138.0	3.5546	5.4414
340	146.08	0.0016390	0.01078	1596.8	2622.3	1025.5	3.6638	5.3363
350	165.37	0.0017407	0.008822	1672.9	2566.1	893.2	3.7816	5.2149
360	186.74	0.0018930	0.006970	1763.1	2485.7	722.6	3.9189	5.0603
370	210.53	0.002231	0.004958	1896.2	2335.7	439.5	4.1198	4.8031
371	213.06	0.002298	0.004710	1916.5	2310.7	394.2	4.1503	4.7624
372	215.62	0.002392	0.004432	1942.0	2280.1	338.1	4.1891	4.7130
373	218.21	0.002525	0.004090	1974.5	2238.3	263.8	4.2385	4.6467
374	220.84	0.002834	0.003482	2039.2	2150.7	111.5	4.3374	4.5096

临界参数

$p_c = 22.12$ MPa

$v_c = 0.003147$ m³/kg

$t_c = 374.12$℃

$h_c = 2095.2$ kJ/kg

$s_c = 4.4237$ kJ/(kg·K)

表 1.1.4-23　**饱和水与饱和蒸汽表**（按压力排列）

压力	温度	比容		焓		汽化潜热	熵	
		液体	蒸汽	液体	蒸汽		液体	蒸汽
p	t	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
10^5Pa	℃	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	$\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$
0.010	6.982	0.0010001	129.208	29.33	2513.8	2484.5	0.1060	8.9756
0.020	17.511	0.0010012	67.006	73.45	2533.2	2459.8	0.2606	8.7236
0.030	24.098	0.0010027	45.668	101.00	2545.2	2444.2	0.3543	8.5776
0.040	28.981	0.0010040	34.803	121.41	2554.1	2432.7	0.4224	8.4747
0.050	32.90	0.0010052	28.196	137.77	2561.2	2423.4	0.4762	8.3952
0.060	36.18	0.0010064	23.742	151.50	2567.1	2415.6	0.5209	8.3305
0.070	39.02	0.0010074	20.532	163.38	2572.2	2408.8	0.5591	8.2760
0.080	41.53	0.0010084	18.106	173.87	2576.7	2402.8	0.5926	8.2289
0.090	43.79	0.0010094	16.206	183.28	2580.8	2397.5	0.6224	8.1875
0.10	45.83	0.0010102	14.676	191.84	2584.4	2392.6	0.6493	8.1505
0.15	54.00	0.0010140	10.025	225.98	2598.9	2372.9	0.7549	8.0089
0.20	60.09	0.0010172	7.6515	251.46	2609.6	2358.1	0.8321	7.9092
0.25	64.99	0.0010199	6.2060	271.99	2618.1	2346.1	0.8932	7.8321
0.30	69.12	0.0010223	5.2308	289.31	2625.3	2336.0	0.9441	7.7695
0.40	75.89	0.0010265	3.9949	317.65	2636.8	2319.2	1.0261	7.6711
0.50	81.35	0.0010301	3.2415	340.57	2646.0	2305.4	1.0912	7.5951
0.60	85.95	0.0010333	2.7329	359.93	2653.6	2293.7	1.1454	7.5332
0.70	89.96	0.0010361	2.3658	376.77	2660.2	2283.4	1.1921	7.4811
0.80	93.51	0.0010387	2.0879	391.72	2666.0	2274.3	1.2330	7.4360
0.90	96.71	0.0010412	1.8701	405.21	2671.1	2265.9	1.2696	7.3963
1.0	99.63	0.0010434	1.6946	417.51	2675.7	2258.2	1.3027	7.3608
1.2	104.81	0.0010476	1.4289	439.36	2683.8	2244.4	1.3609	7.2996
1.4	109.32	0.0010513	1.2370	458.42	2690.8	2232.4	1.4109	7.2480
1.6	113.32	0.0010547	1.0917	475.38	2696.8	2221.4	1.4550	7.2032
1.8	116.93	0.0010579	0.97775	490.70	2702.1	2211.4	1.4944	7.1638
2.0	120.23	0.0010608	0.88592	504.7	2706.9	2202.2	1.5301	7.1286
2.5	127.43	0.0010675	0.71881	535.4	2717.2	2181.8	1.6072	7.0540
3.0	133.54	0.0010735	0.60586	561.4	2725.5	2164.1	1.6717	6.9930
3.5	138.88	0.0010789	0.52425	584.3	2732.5	2148.2	1.7273	6.9414
4.0	143.62	0.0010839	0.46242	604.7	2738.5	2133.8	1.7764	6.8966
4.5	147.92	0.0010885	0.41392	623.2	2743.8	2120.6	1.8204	6.8570
5.0	151.85	0.0010928	0.37481	640.1	2748.5	2108.4	1.8604	6.8215
6.0	158.84	0.0011009	0.31556	670.4	2756.4	2086.0	1.9308	6.7598
7.0	164.96	0.0011082	0.27274	697.1	2762.9	2065.8	1.9918	6.7074
8.0	170.42	0.0011150	−0.24030	720.9	2768.4	2047.5	2.0457	6.6618
9.0	175.36	0.0011213	0.21484	742.6	2773.0	2030.4	2.0941	6.6212

续上表

压力	温度	比容		焓		汽化潜热	熵	
		液体	蒸汽	液体	蒸汽		液体	蒸汽
p	t	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
10^5Pa	℃	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{(kg \cdot K)}$	$\frac{kJ}{(kg \cdot K)}$
10.0	179.88	0.0011274	0.19430	762.6	2777.0	2014.4	2.1382	6.5847
11.0	184.06	0.0011331	0.17739	781.1	2780.4	1999.3	2.1786	6.5515
12.0	187.96	0.0011386	0.16320	798.4	2783.4	1985.0	2.2160	6.5210
13.0	191.60	0.0011438	0.15112	814.7	2786.0	1971.3	2.2509	6.4927
14.0	195.04	0.0011489	0.14072	830.1	2788.4	1958.3	2.2836	6.4665
15.0	198.28	0.0011538	0.13165	844.7	2790.4	1945.7	2.3144	6.4418
16.0	201.37	0.0011586	0.12368	858.6	2792.2	1933.6	2.3436	6.4187
17.0	204.30	0.0011633	0.11661	871.8	2793.8	1922.0	2.3712	6.3967
18.0	207.10	0.0011678	0.11031	884.6	2795.1	1910.5	2.3976	6.3759
19.0	209.79	0.0011722	0.10464	896.8	2796.4	1899.6	2.4227	6.3561
20.0	212.37	0.0011766	0.09953	908.6	2797.4	1888.8	2.4468	6.3373
22.0	217.24	0.0011850	0.09064	930.9	2799.1	1868.2	2.4922	6.3018
24.0	221.78	0.0011932	0.08319	951.9	2800.4	1848.5	2.5343	6.2691
26.0	226.03	0.0012011	0.07685	971.7	2801.2	1829.5	2.5736	6.2386
28.0	230.04	0.0012088	0.07138	990.5	2801.7	1811.2	2.6106	6.2101
30.0	233.84	0.0012163	0.06662	1008.4	2801.9	1793.5	2.6455	6.1832
35.0	242.54	0.0012345	0.05702	1049.8	2801.3	1751.5	2.7253	6.1218
40.0	250.33	0.0012521	0.04974	1087.5	2799.4	1711.9	2.7967	6.0670
50.0	263.92	0.0012858	0.03941	1154.6	2792.8	1638.2	2.9209	5.9712
60.6	275.56	0.0013187	0.03241	1213.9	2783.3	1569.4	3.0277	5.8878
70.0	285.80	0.0013514	0.02734	1267.7	2771.4	1503.7	3.1225	5.8126
80.0	294.98	0.0013843	0.02349	1317.5	2757.5	1440.0	3.2083	5.7430
90.0	303.31	0.0014179	0.02046	1364.2	2741.8	1377.6	3.2875	5.6773
100	310.96	0.0014526	0.01800	1408.6	2724.4	1315.8	3.3616	5.6143
110	318.04	0.0014887	0.01597	1451.2	2705.4	1254.2	3.4316	5.5531
120	324.64	0.0015267	0.01425	1492.6	2684.8	1192.2	3.4986	5.4930
130	330.81	0.0015670	0.01277	1533.0	2662.4	1129.4	3.5633	5.4333
140	336.63	0.0016104	0.01149	1572.8	2638.3	1065.5	3.6262	5.3737
150	342.12	0.0016580	0.01035	1612.2	2611.6	999.4	3.6877	5.3122
160	347.32	0.0017101	0.009330	1651.5	2582.7	931.2	3.7486	5.2496
170	352.26	0.0017690	0.008401	1691.6	2550.8	859.2	3.8103	5.1841
180	356.96	0.0018380	0.007534	1733.4	2514.4	781.0	3.8739	5.1135
190	361.44	0.0019231	0.006700	1778.2	2470.1	691.9	3.9417	5.0321
200	365.71	0.002038	0.005873	1828.8	2413.8	585.0	4.0181	4.9338
210	369.79	0.002218	0.005006	1892.2	2340.2	448.0	4.1137	4.8106
220	373.68	0.002675	0.003757	2007.7	2192.5	184.8	4.2891	4.5748

表 1.1.4-24　　**未饱和水与过热蒸汽表**

p	0.001 MPa			0.005 MPa		
	$t_s=6.982$ $v'=0.0010001$　$v''=129.208$ $h'=29.33$　$h''=2513.8$ $s'=0.1060$　$s''=8.9756$			$t_s=32.90$ $v'=0.0010052$　$v''=28.196$ $h'=137.77$　$h''=2561.2$ $s'=0.4762$　$s''=8.3952$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0010002	0.0	−0.0001	0.0010002	0.0	−0.0001
10	130.60	2519.5	8.9956	0.0010002	42.0	0.1510
20	135.23	2538.1	9.0604	0.0010017	83.9	0.2963
40	144.47	2575.5	9.1837	28.86	2574.6	8.4385
60	153.71	2613.0	9.2997	30.71	2612.3	8.5552
80	162.95	2650.6	9.4093	32.57	2650.0	8.6652
100	172.19	2688.3	9.5132	34.42	2687.9	8.7695
120	181.42	2726.2	9.6122	36.27	2725.9	8.8687
140	190.66	2764.3	9.7066	38.12	2764.0	8.9633
160	199.89	2802.6	9.7971	39.97	2802.3	9.0539
180	209.12	2841.0	9.8839	41.81	2840.8	9.1408
200	218.35	2879.7	9.9674	43.66	2879.5	9.2244
220	227.58	2918.6	10.0480	45.51	2918.5	9.3049
240	236.82	2957.7	10.1257	47.36	2957.6	9.3828
260	246.05	2997.1	10.2010	49.20	2997.0	9.4580
280	255.28	3036.7	10.2739	51.05	3036.6	9.5310
300	264.51	3076.5	10.3446	52.90	3076.4	9.6017
350	287.58	3177.2	10.5130	57.51	3177.1	9.7702
400	310.66	3279.5	10.6709	62.13	3279.4	9.9280
450	333.74	3383.4	10.820	66.74	3383.3	10.077
500	356.81	3489.0	10.961	71.36	3489.0	10.218
550	379.89	3596.3	11.095	75.98	3596.2	10.352
600	402.96	3705.3	11.224	80.59	3705.3	10.481

续上表

p	0.01 MPa			0.05 MPa		
	$t_s=45.83$ $v'=0.0010102$　$v''=14.676$ $h'=191.84$　$h''=2584.4$ $s'=0.6493$　$s''=8.1505$			$t_s=81.35$ $v'=0.0010301$　$v''=3.2415$ $h'=340.57$　$h''=2646.0$ $s'=1.0912$　$s''=7.5951$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0010002	0.0	−0.0001	0.0010002	0.0	−0.0001
10	0.0010002	42.0	0.1510	0.0010002	42.0	0.1510
20	0.0010017	83.9	0.2963	0.0010017	83.9	0.2963
40	0.0010078	167.4	0.5721	0.0010078	167.5	0.5721
60	15.34	2611.3	8.2331	0.0010171	251.1	0.8310
80	16.27	2649.3	8.3437	0.0010292	334.9	1.0752
100	17.20	2687.3	8.4484	3.419	2682.6	7.6958

续上表

p	0.01 MPa			0.05 MPa		
	$t_s=45.83$ $v'=0.0010102$ $v''=14.676$ $h'=191.84$ $h''=2584.4$ $s'=0.6493$ $s''=8.1505$			$t_s=81.35$ $v'=0.0010301$ $v''=3.2415$ $h'=340.57$ $h''=2646.0$ $s'=1.0912$ $s''=7.5951$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
120	18.12	2725.4	8.5479	3.608	2721.7	7.7977
140	19.05	2763.6	8.6427	3.796	2760.6	7.8942
160	19.98	2802.0	8.7334	3.983	2799.5	7.9862
180	20.90	2840.6	8.8204	4.170	2838.4	8.0741
200	21.82	2879.3	8.9041	4.356	2877.5	8.1584
220	22.75	2918.3	8.9848	4.542	2916.7	8.2396
240	23.67	2957.4	9.0626	4.728	2956.1	8.3178
260	24.60	2996.8	9.1379	4.913	2995.6	8.3934
280	25.52	3036.5	9.2109	5.099	3035.4	8.4667
300	26.44	3076.3	9.2817	5.284	3075.3	8.5376
350	28.75	3177.0	9.4502	5.747	3176.3	8.7065
400	31.06	3279.4	9.6081	6.209	3278.7	8.8646
450	33.37	3383.3	9.7570	6.671	3382.8	9.0137
500	35.68	3488.9	9.8982	7.134	3488.5	9.1550
550	37.99	3596.2	10.033	7.595	3595.8	9.2896
600	40.29	3705.2	10.161	8.057	3704.9	9.4182

续上表

p	0.1 MPa			0.2 MPa		
	$t_s=99.63$ $v'=0.0010434$ $v''=1.6946$ $h'=417.51$ $h''=2675.7$ $s'=1.3027$ $s''=7.3608$			$t_s=120.23$ $v'=0.0010608$ $v''=0.88592$ $h'=504.7$ $h''=2706.9$ $s'=1.5301$ $s''=7.1286$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0010002	0.1	−0.0001	0.0010001	0.2	−0.0001
10	0.0010002	42.1	0.1510	0.0010002	42.2	0.1510
20	0.0010017	84.0	0.2963	0.0010016	84.0	0.2963
40	0.0010078	167.5	0.5721	0.0010077	167.6	0.5720
60	0.0010171	251.2	0.8309	0.0010171	251.2	0.8309
80	0.0010292	335.0	1.0752	0.0010291	335.0	1.0752
100	1.696	2676.5	7.3628	0.0010437	419.1	1.3068
120	1.793	2716.8	7.4681	0.0010606	503.7	1.5276
140	1.889	2756.6	7.5669	0.9353	2748.4	7.2314
160	1.984	2796.2	7.6605	0.9842	2789.5	7.3286
180	2.078	2835.7	7.7496	1.0326	2830.1	7.4203
200	2.172	2875.2	7.8348	1.080	2870.5	7.5073
220	2.266	2914.7	7.9166	1.128	2910.6	7.5905
240	2.359	2954.3	7.9954	1.175	2950.8	7.6704
260	2.453	2994.1	8.0714	1.222	2991.0	7.7472
280	2.546	3034.0	8.1449	1.269	3031.3	7.8214

续上表

p	0.1 MPa			0.2 MPa		
	$t_s=99.63$ $v'=0.0010434$　$v''=1.6946$ $h'=417.51$　$h''=2675.7$ $s'=1.3027$　$s''=7.3608$			$t_s=120.23$ $v'=0.0010608$　$v''=0.88592$ $h'=504.7$　$h''=2706.9$ $s'=1.5301$　$s''=7.1286$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
300	2.639	3074.1	8.2162	1.316	3071.7	7.8931
350	2.871	3175.3	8.3854	1.433	3173.4	8.0633
400	3.103	3278.0	8.5439	1.549	3276.5	8.2223
450	3.334	3382.2	8.6932	1.665	3380.9	8.3720
500	3.565	3487.9	8.8346	1.781	3486.9	8.5137
550	3.797	3595.4	8.9693	1.897	3594.5	8.6485
600	4.028	3704.5	9.0979	2.013	3703.7	8.7774

续上表

p	0.5 MPa			1 MPa		
	$t_s=151.85$ $v'=0.0010928$　$v''=0.37481$ $h'=640.1$　$h''=2748.5$ $s'=1.8604$　$s''=6.8215$			$t_s=179.88$ $v'=0.0011274$　$v''=0.19430$ $h'=762.6$　$h''=2777.0$ $s'=2.1382$　$s''=6.5847$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0010000	0.5	−0.0001	0.0009997	1.0	−0.0001
10	0.0010000	42.5	0.1509	0.0009998	43.0	0.1509
20	0.0010015	84.3	0.2962	0.0010013	84.8	0.2961
40	0.0010076	167.9	0.5719	0.0010074	168.3	0.5717
60	0.0010169	251.5	0.8307	0.0010167	251.9	0.8305
80	0.0010290	335.3	1.0750	0.0010287	335.7	1.0746
100	0.0010435	419.4	1.3066	0.0010432	419.7	1.3062
120	0.0010605	503.9	1.5273	0.0010602	504.3	1.5269
140	0.0010800	589.2	1.7388	0.0010796	589.5	1.7383
160	0.3836	2767.3	6.8654	0.0011019	675.7	1.9420
180	0.4046	2812.1	6.9665	0.1944	2777.3	6.5854
200	0.4250	2855.5	7.0602	0.2059	2827.5	6.6940
220	0.4450	2898.0	7.1481	0.2169	2874.9	6.7921
240	0.4646	2939.9	7.2315	0.2275	2920.5	6.8826
260	0.4841	2981.5	7.3110	0.2378	2964.8	6.9674
280	0.5034	3022.9	7.3872	0.2480	3008.3	7.0475
300	0.5226	3064.2	7.4606	0.2580	3051.3	7.1239
350	0.5701	3167.6	7.6335	0.2825	3157.7	7.3018
400	0.6172	3271.8	7.7944	0.3066	3264.0	7.4606
420	0.6360	3313.8	7.8558	0.3161	3306.6	7.5283
440	0.6548	3355.9	7.9158	0.3256	3349.3	7.5890
450	0.6641	3377.1	7.9452	0.3304	3370.7	7.6188
460	0.6735	3398.3	7.9743	0.3351	3392.1	7.6482
480	0.6922	3440.9	8.0316	0.3446	3435.1	7.7061
500	0.7109	3483.7	8.0877	0.3540	3478.3	7.7627
550	0.7575	3591.7	8.2232	0.3776	3587.2	7.8991
600	0.8040	3701.4	8.3525	0.4010	3697.4	8.0292

续上表

p	2 MPa			3 MPa		
	t_s=212.37 v'=0.0011766 v''=0.09953 h'=908.6 h''=2797.4 s'=2.4468 s''=6.3373			t_s=233.84 v'=0.0012163 v''=0.06662 h'=1008.4 h''=2801.9 s'=2.6455 s''=6.1832		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0009992	2.0	0.0000	0.0009987	3.0	0.0001
10	0.0009993	43.9	0.1508	0.0009988	44.9	0.1507
20	0.0010008	85.7	0.2959	0.0010004	86.7	0.2957
40	0.0010069	169.2	0.5713	0.0010065	170.1	0.5709
60	0.0010162	252.7	0.8299	0.0010158	253.6	0.8294
80	0.0010282	336.5	1.0740	0.0010278	337.3	1.0733
100	0.0010427	420.5	1.3054	0.0010422	421.2	1.3046
120	0.0010596	505.0	1.5260	0.0010590	505.7	1.5250
140	0.0010790	590.2	1.7373	0.0010783	590.8	1.7362
160	0.0011012	676.3	1.9408	0.0011005	676.9	1.9396
180	0.0011266	763.6	2.1379	0.0011258	764.1	2.1366
200	0.0011560	852.6	2.3300	0.0011550	853.0	2.3284
220	0.10211	2820.4	6.3842	0.0011891	943.9	2.5166
240	0.1084	2876.3	6.4953	0.06818	2823.0	6.2245
260	0.1144	2927.9	6.5941	0.07286	2885.5	6.3440
280	0.1200	2976.9	6.6842	0.07714	2941.8	6.4477
300	0.1255	3024.0	6.7679	0.08116	2994.2	6.5408
350	0.1386	3137.2	6.9574	0.09053	3115.7	6.7443
400	0.1512	3248.1	7.1285	0.09933	3231.6	6.9231
420	0.1561	3291.9	7.1927	0.10276	3276.9	6.9894
440	0.1610	3335.7	7.2550	0.1061	3321.9	7.0535
450	0.1635	3357.7	7.2855	0.1078	3344.4	7.0847
460	0.1659	3379.6	7.3156	0.1095	3366.8	7.1155
480	0.1708	3423.5	7.3747	0.1128	3411.6	7.1758
500	0.1756	3467.4	7.4323	0.1161	3456.4	7.2345
550	0.1876	3578.0	7.5708	0.1243	3568.6	7.3752
600	0.1995	3689.5	7.7024	0.1324	3681.5	7.5084

续上表

p	4 MPa			5 MPa		
	t_s=250.33 v'=0.0012521 v''=0.04974 h'=1087.5 h''=2799.4 s'=2.7967 s''=6.0670			t_s=263.92 v'=0.0012858 v''=0.03941 h'=1154.6 h''=2792.8 s'=2.9209 s''=5.9712		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0009982	4.0	0.0002	0.0009977	5.1	0.0002
10	0.0009984	45.9	0.1506	0.0009979	46.9	0.1505
20	0.0009999	87.6	0.2955	0.0009995	88.6	0.2952
40	0.0010060	171.0	0.5706	0.0010056	171.9	0.5702

续上表

p	4 MPa			5 MPa		
	$t_s=250.33$ $v'=0.0012521$　$v''=0.04974$ $h'=1087.5$　$h''=2799.4$ $s'=2.7967$　$s''=6.0670$			$t_s=263.92$ $v'=0.0012858$　$v''=0.03941$ $h'=1154.6$　$h''=2792.8$ $s'=2.9209$　$s''=5.9712$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
60	0.0010153	254.4	0.8288	0.0010149	255.3	0.8283
80	0.0010273	338.1	1.0726	0.0010268	338.8	1.0720
100	0.0010417	422.0	1.3038	0.0010412	422.7	1.3030
120	0.0010584	506.4	1.5242	0.0010579	507.1	1.5232
140	0.0010777	591.5	1.7352	0.0010771	592.1	1.7342
160	0.0010997	677.5	1.9385	0.0010990	678.0	1.9373
180	0.0011249	764.6	2.1352	0.0011241	765.2	2.1339
200	0.0011540	853.4	2.3268	0.0011530	853.8	2.3253
220	0.0011878	944.2	2.5147	0.0011866	944.4	2.5129
240	0.0012280	1037.7	2.7007	0.0012264	1037.8	2.6985
260	0.05174	2835.6	6.1355	0.0012750	1135.0	2.8842
280	0.05547	2902.2	6.2581	0.04224	2857.0	6.0889
300	0.05885	2961.5	6.3634	0.04532	2925.4	6.2104
350	0.06645	3093.1	6.5838	0.05194	3069.2	6.4513
400	0.07339	3214.5	6.7713	0.05780	3196.9	6.6486
420	0.07606	3261.4	6.8399	0.06002	3245.4	6.7196
440	0.07869	3307.7	6.9058	0.06220	3293.2	6.7875
450	0.07999	3330.7	6.9379	0.06327	3316.8	6.8204
460	0.08128	3353.7	6.9694	0.06434	3340.4	6.8528
480	0.08384	3399.5	7.0310	0.06644	3387.2	6.9158
500	0.08638	3445.2	7.0909	0.06853	3433.8	6.9768
550	0.09264	3559.2	7.2338	0.07363	3549.6	7.1221
600	0.09879	3673.4	7.3686	0.07864	3665.4	7.2586

续上表

p	6 MPa			7 MPa		
	$t_s=275.56$ $v'=0.0013187$　$v''=0.03241$ $h'=1213.9$　$h''=2783.3$ $s'=3.0277$　$s''=5.8878$			$t_s=285.80$ $v'=0.0013514$　$v''=0.02734$ $h'=1267.7$　$h''=2771.4$ $s'=3.1225$　$s''=5.8126$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0009972	6.1	0.0003	0.0009967	7.1	0.0004
10	0.0009974	47.8	0.1505	0.0009970	48.8	0.1504
20	0.0009990	89.5	0.2951	0.0009986	90.4	0.2948
40	0.0010051	172.7	0.5698	0.0010047	173.6	0.5694
60	0.0010144	256.1	0.8278	0.0010140	256.9	0.8273
80	0.0010263	339.6	1.0713	0.0010259	340.4	1.0707
100	0.0010406	423.5	1.3023	0.0010401	424.2	1.3015
120	0.0010573	507.8	1.5224	0.0010567	508.5	1.5215
140	0.0010764	592.8	1.7332	0.0010758	593.4	1.7321

续上表

p	6 MPa			7 MPa		
	t_s=275.56 v'=0.0013187 v''=0.03241 h'=1213.9 h''=2783.3 s'=3.0277 s''=5.8878			t_s=285.80 v'=0.0013514 v''=0.02734 h'=1267.7 h''=2771.4 s'=3.1225 s''=5.8126		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)
160	0.0010983	678.6	1.9361	0.0010976	679.2	1.9350
180	0.0011232	765.7	2.1325	0.0011224	766.2	2.1312
200	0.0011519	854.2	2.3237	0.0011510	854.6	2.3222
220	0.0011853	944.7	2.5111	0.0011841	945.0	2.5093
240	0.0012249	1037.9	2.6963	0.0012233	1038.0	2.6941
260	0.0012729	1134.8	2.8815	0.0012708	1134.7	2.8789
280	0.03317	2804.0	5.9253	0.0013307	1236.7	3.0667
300	0.03616	2885.0	6.0693	0.02946	2839.2	5.9322
350	0.04223	3043.9	6.3356	0.03524	3017.0	6.2306
400	0.04738	3178.6	6.5438	0.03992	3159.7	6.4511
450	0.05212	3302.6	6.7214	0.04414	3288.0	6.6350
500	0.05662	3422.2	6.8814	0.04810	3410.5	6.7988
520	0.05837	3469.5	6.9417	0.04964	3458.6	6.8602
540	0.06010	3516.5	7.0003	0.05116	3506.4	6.9198
550	0.06096	3540.0	7.0291	0.05191	3530.2	6.9490
560	0.06182	3563.5	7.0575	0.05266	3554.1	6.9778
580	0.06352	3610.4	7.1131	0.05414	3601.6	7.0342
600	0.06521	3657.2	7.1673	0.05561	3649.0	7.0890

续上表

p	8 MPa			9 MPa		
	t_s=294.98 v'=0.0013843 v''=0.02349 h'=1317.5 h''=2757.5 s'=3.2083 s''=5.7430			t_s=303.31 v'=0.0014179 v''=0.02046 h'=1364.2 h''=2741.8 s'=3.2875 s''=5.6773		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)
0	0.0009962	8.1	0.0004	0.0009958	9.1	0.0005
10	0.0009965	49.8	0.1503	0.0009960	50.7	0.1502
20	0.0009981	91.4	0.2946	0.0009977	92.3	0.2944
40	0.0010043	174.5	0.5690	0.0010038	175.4	0.5686
60	0.0010135	257.8	0.8267	0.0010131	258.6	0.8262
80	0.0010254	341.2	1.0700	0.0010249	342.0	1.0694
100	0.0010396	425.0	1.3007	0.0010391	425.8	1.3000
120	0.0010562	509.2	1.5206	0.0010556	509.9	1.5197
140	0.0010752	594.1	1.7311	0.0010745	594.7	1.7301
160	0.0010968	679.8	1.9338	0.0010961	680.4	1.9326
180	0.0011216	766.7	2.1299	0.0011207	767.2	2.1286
200	0.0011500	855.1	2.3207	0.0011490	855.5	2.3191
220	0.0011829	945.3	2.5075	0.0011817	945.6	2.5057
240	0.0012218	1038.2	2.6920	0.0012202	1038.3	2.6899

续上表

p	8 MPa			9 MPa		
	t_s=294.98 v'=0.0013843 v''=0.02349 h'=1317.5 h''=2757.5 s'=3.2083 s''=5.7430			t_s=303.31 v'=0.0014179 v''=0.02046 h'=1364.2 h''=2741.8 s'=3.2875 s''=5.6773		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
260	0.0012687	1134.6	2.8762	0.0012667	1134.4	2.8737
280	0.0013277	1236.2	3.0633	0.0013249	1235.6	3.0600
300	0.02425	2785.4	5.7918	0.0014022	1344.9	3.2539
350	0.02995	2988.3	6.1324	0.02579	2957.5	6.0383
400	0.03431	3140.1	6.3670	0.02993	3119.7	6.2891
450	0.03815	3273.1	6.5577	0.03348	3257.9	6.4872
500	0.04172	3398.5	6.7254	0.03675	3386.4	6.6592
520	0.04309	3447.6	6.7881	0.03800	3436.4	6.7230
540	0.04445	3496.2	6.8486	0.03923	3485.9	6.7846
550	0.04512	3520.4	6.8783	0.03984	3510.5	6.8147
560	0.04578	3544.6	6.9075	0.04044	3535.0	6.8444
580	0.04710	3592.8	6.9646	0.04163	3583.9	6.9023
600	0.04841	3640.7	7.0201	0.04281	3632.4	6.9585

续上表

p	10 MPa			12 MPa		
	t_s=310.96 v'=0.0014526 v''=0.01800 h'=1408.6 h''=2724.4 s'=3.3616 s''=5.6143			t_s=324.64 v'=0.0015267 v''=0.01425 h'=1492.6 h''=2684.8 s'=3.4986 s''=5.4930		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0009953	10.1	0.0005	0.0009943	12.1	0.0006
10	0.0009956	51.7	0.1500	0.0009947	53.6	0.1498
20	0.0009972	93.2	0.2942	0.0009964	95.1	0.2937
40	0.0010034	176.3	0.5682	0.0010026	178.1	0.5674
60	0.0010126	259.4	0.8257	0.0010118	261.1	0.8246
80	0.0010244	342.8	1.0687	0.0010235	344.4	1.0674
100	0.0010386	426.5	1.2992	0.0010376	428.0	1.2977
120	0.0010551	510.6	1.5188	0.0010540	512.0	1.5170
140	0.0010739	595.4	1.7291	0.0010727	596.7	1.7271
160	0.0010594	681.0	1.9315	0.0010940	682.2	1.9292
180	0.0011199	767.8	2.1272	0.0011183	768.8	2.1246
200	0.0011480	855.9	2.3176	0.0011461	856.8	2.3146
220	0.0011805	946.0	2.5040	0.0011782	946.6	2.5005
240	0.0012188	1038.4	2.6878	0.0012158	1038.8	2.6837
260	0.0012648	1134.3	2.8711	0.0012609	1134.2	2.8661
280	0.0013221	1235.2	3.0567	0.0013167	1234.3	3.0503
300	0.0013978	1343.7	3.2494	0.0013895	1341.5	3.2407
350	0.02242	2924.2	5.9464	0.01721	2848.4	5.7615
400	0.02641	3098.5	6.2158	0.02108	3053.3	6.0787
450	0.02974	3242.2	6.4220	0.02411	3209.9	6.3032

续上表

p	10 MPa			12 MPa		
	t_s=310.96 v'=0.0014526 v''=0.01800 h'=1408.6 h''=2724.4 s'=3.3616 s''=5.6143			t_s=324.64 v'=0.0015267 v''=0.01425 h'=1492.6 h''=2684.8 s'=3.4986 s''=5.4930		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)
500	0.03277	3374.1	6.5984	0.02679	3349.0	6.4893
520	0.03392	3425.1	6.6635	0.02780	3402.1	6.5571
540	0.03505	3475.4	6.7262	0.02878	3454.2	6.6220
550	0.03561	3500.4	6.7568	0.02926	3480.0	6.6536
560	0.03616	3525.4	6.7869	0.02974	3505.7	6.6847
580	0.03726	3574.9	6.8456	0.03068	3556.7	6.7451
600	0.03833	3624.0	6.9025	0.03161	3607.0	6.8034

续上表

p	14 MPa			16 MPa		
	t_s=336.63 v'=0.0016104 v''=0.01149 h'=1572.8 h''=2638.3 s'=3.6262 s''=5.3737			t_s=347.32 v'=0.0017101 v''=0.009330 h'=1651.5 h''=2582.7 s'=3.7486 s''=5.2496		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)
0	0.0009933	14.1	0.0007	0.0009924	16.1	0.0008
10	0.0009938	55.6	0.1496	0.0009928	57.5	0.1494
20	0.0009955	97.0	0.2933	0.0009946	98.8	0.2928
40	0.0010017	179.8	0.5666	0.0010008	181.6	0.5659
60	0.0010109	262.8	0.8236	0.0010100	264.5	0.8225
80	0.0010226	346.0	1.0661	0.0010217	347.6	1.0648
100	0.0010366	429.5	1.2961	0.0010356	431.0	1.2946
120	0.0010529	513.5	1.5153	0.0010518	514.9	1.5136
140	0.0010715	598.0	1.7251	0.0010703	599.4	1.7231
160	0.0010926	683.4	1.9269	0.0010912	684.6	1.9247
180	0.0011167	769.9	2.1220	0.0011151	771.0	2.1195
200	0.0011442	857.7	2.3117	0.0011423	858.6	2.3087
220	0.0011759	947.2	2.4936	0.0011736	947.9	2.4936
240	0.0012129	1039.1	2.6796	0.0012101	1039.5	2.6756
260	0.0012572	1134.1	2.8612	0.0012535	1134.0	2.8563
280	0.0013115	1233.5	3.0441	0.0013065	1232.8	3.0381
300	0.0013816	1339.5	3.2324	0.0013742	1337.7	3.2245
350	0.01323	2753.5	5.5606	0.009782	2618.5	5.3071
400	0.01722	3004.0	5.9488	0.01427	2949.7	5.8215
450	0.02007	3175.8	6.1953	0.01702	3140.0	6.0947
500	0.02251	3323.0	6.3922	0.01929	3296.3	6.3038
520	0.02342	3378.4	6.4630	0.02013	3354.2	6.3777
540	0.02430	3432.5	6.5304	0.2093	3410.4	6.4477
550	0.02473	3459.2	6.5631	0.02132	3438.0	6.4816
560	0.02515	3485.8	6.5951	0.02171	3465.4	6.5146
580	0.02599	3538.2	6.6573	0.02247	3519.4	6.5787
600	0.02681	3589.8	6.7172	0.02321	3572.4	6.6401

续上表

p	18 MPa			20 MPa		
	$t_s=356.96$ $v'=0.0018380$ $v''=0.007534$ $h'=1733.4$ $h''=2514.4$ $s'=3.8739$ $s''=5.1135$			$t_s=365.71$ $v'=0.002038$ $v''=0.005873$ $h'=1828.8$ $h''=2413.8$ $s'=4.0181$ $s''=4.9338$		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0009914	18.1	0.0008	0.0009904	20.1	0.0008
10	0.0009919	59.4	0.1491	0.0009910	61.3	0.1489
20	0.0009937	100.7	0.2924	0.0009929	102.5	0.2919
40	0.0010000	183.3	0.5651	0.0009992	185.1	0.5643
60	0.0010092	266.1	0.8215	0.0010083	267.8	0.8204
80	0.0010208	349.2	1.0636	0.0010199	350.8	1.0623
100	0.0010346	432.5	1.2931	0.0010337	434.0	1.2916
120	0.0010507	516.3	1.5118	0.0010496	517.7	1.5101
140	0.0010691	600.7	1.7212	0.0010679	602.0	1.7192
160	0.0010899	685.9	1.9225	0.0010886	687.1	1.9203
180	0.0011136	772.0	2.1170	0.0011120	773.1	2.1145
200	0.0011405	859.5	2.3058	0.0011387	860.4	2.3030
220	0.0011714	948.6	2.4903	0.0011693	949.3	2.4870
240	0.0012074	1039.9	2.6717	0.0012047	1040.3	2.6678
260	0.0012500	1134.0	2.8516	0.0012466	1134.1	2.8470
280	0.0013017	1232.1	3.0323	0.0012971	1231.6	3.0266
300	0.0013672	1336.1	3.2168	0.0013606	1334.6	3.2095
350	0.0017042	1660.9	3.7582	0.001666	1648.4	3.7327
400	0.01191	2889.0	5.6926	0.009952	2820.1	5.5578
450	0.01463	3102.3	5.9989	0.01270	3062.4	5.9061
500	0.01678	3268.7	6.2215	0.01477	3240.2	6.1440
520	0.01756	3329.3	6.2989	0.01551	3303.7	6.2251
540	0.01831	3387.7	6.3717	0.01621	3364.6	6.3009
550	0.01867	3416.4	6.4068	0.01655	3394.3	6.3373
560	0.01903	3444.7	6.4410	0.01688	3423.6	6.3726
580	0.01973	3500.3	6.5070	0.01753	3480.9	6.4406
600	0.02041	3554.8	6.5701	0.01816	3536.9	6.5055

续上表

p	25 MPa			30 MPa		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.0009881	25.1	0.0009	0.0009857	30.0	0.0008
10	0.0009888	66.1	0.1482	0.0009866	70.8	0.1475
20	0.0009907	107.1	0.2907	0.0009886	111.7	0.2895
40	0.0009971	189.4	0.5623	0.0009950	193.8	0.5604
60	0.0010062	272.0	0.8178	0.0010041	276.1	0.8153
80	0.0010177	354.8	1.0591	0.0010155	358.7	1.0560
100	0.0010313	437.8	1.2879	0.0010289	441.6	1.2843
120	0.0010470	521.3	1.5059	0.0010445	524.9	1.5017
140	0.0010650	605.4	1.7144	0.0010621	608.1	1.7097

续上表

p	25 MPa			30 MPa		
t	v	h	s	v	h	s
℃	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
160	0.0010853	690.2	1.9148	0.0010821	693.3	1.9095
180	0.0011082	775.9	2.1083	0.0011046	778.7	2.1022
200	0.0011343	862.8	2.2960	0.0011300	865.2	2.2891
220	0.0011640	951.2	2.4789	0.0011590	953.1	2.4711
240	0.0011983	1041.5	2.6584	0.0011922	1042.8	2.6493
260	0.0012384	1134.3	2.8359	0.0012307	1134.8	2.8252
280	0.0012863	1230.5	3.0130	0.0012762	1229.9	3.0002
300	0.0013453	1331.5	3.1922	0.0013315	1329.0	3.1763
350	0.001600	1626.4	3.6844	0.001554	1611.3	3.6475
400	0.006009	2583.2	5.1472	0.002806	2159.1	4.4854
450	0.009168	2952.1	5.6787	0.006730	2823.1	5.4458
500	0.01113	3165.0	5.9639	0.008679	3083.9	5.7954
520	0.01180	3237.0	6.0558	0.009309	3166.1	5.9004
540	0.01242	3304.7	6.1401	0.009889	3241.7	5.9945
550	0.01272	3337.3	6.1800	0.010165	3277.7	6.0385
560	0.01301	3369.2	6.2185	0.01043	3312.6	6.0806
580	0.01358	3431.2	6.2921	0.01095	3379.8	6.1604
600	0.01413	3491.2	6.3616	0.01144	3444.2	6.2351

粗水平线之上为未饱和水，粗水平线之下为过热蒸汽。

2)水蒸汽的焓熵（h-s）图

水蒸汽的 h-s 图是根据水蒸汽表上所列的各种参数数值绘制而成的，其结构如图 1.1.4-15 所示。在 h-s 图上，液体热、汽化热、过热热量以及绝热膨胀技术功等，都可以用线段表示，简化计算工作量，成为工程上广泛应用的一种重要工具。

工程上用的水蒸汽 h-s 图，如图 1.1.4-16 所示。应用 h-s 图时，首先要有两个独立参数来确定工质的状态点，然后才能确定该状态的有关参数如图 1.1.4-17 所示。例如：

（1）已知 p_1 及 x_1，则可在湿蒸汽区确定点 1，查得 h_1、s_1、t_{s1} 及v_1。

（2）已知干饱和蒸汽的压力 p_2，因干饱和蒸汽 $x=1$，故 p_2 定压线与 $x=1$ 上界限线的交点即为所确定的状态点 2，查得 h_2、s_2、t_{s2} 及 v_2。

（3）已知 p_3 和 t_3，则在过热区内由 p_3 和 t_3 两条曲线的交点得到状态点 3，查得 h_3、s_3 及 v_3。

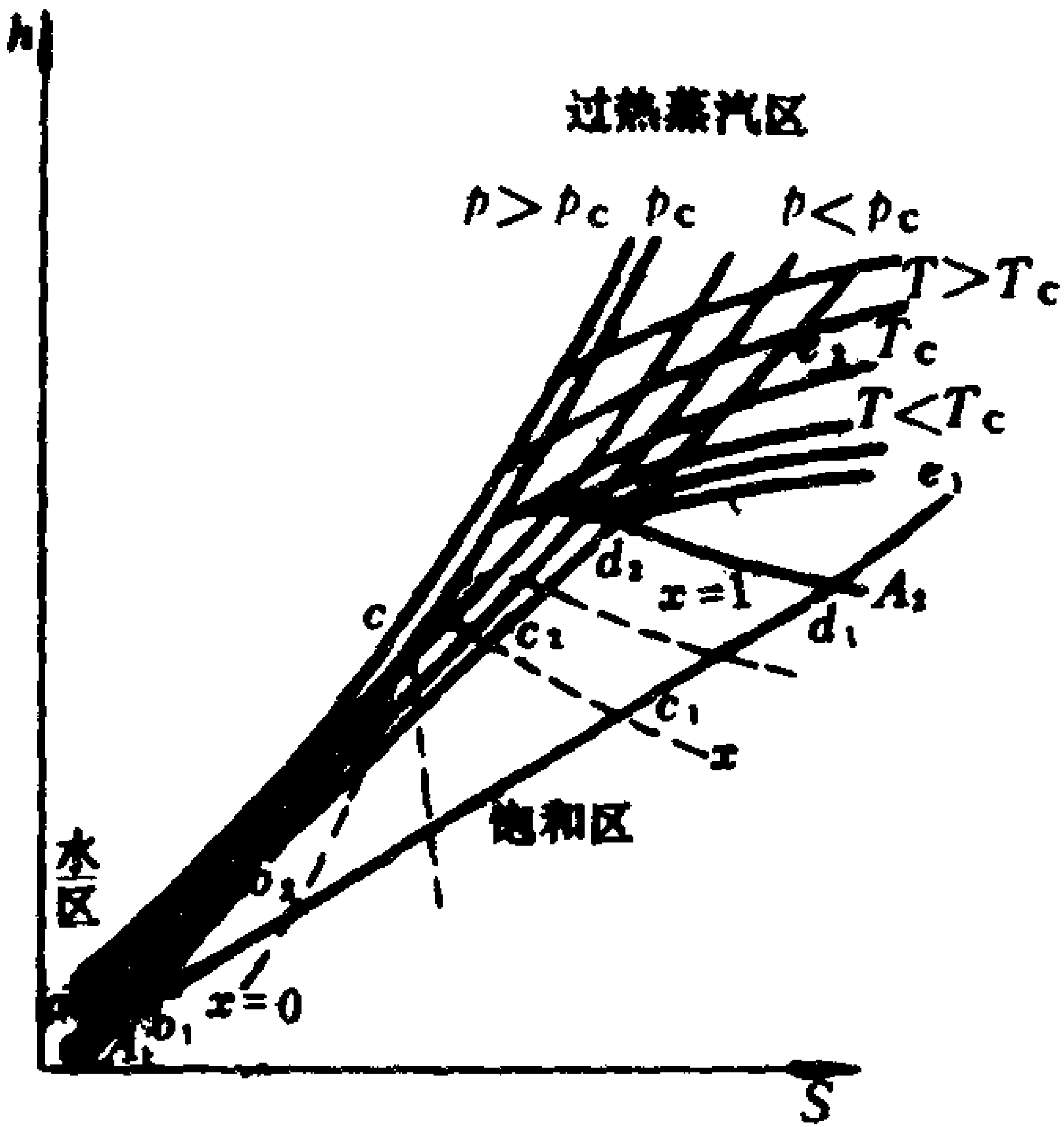


图 1.1.4-15 水蒸汽 h-s 图

5.4 水蒸汽的热力过程

水蒸汽的基本热力过程也同样是定容、等压、等温及等熵等 4 个典型热力过程，它们分别表示在 p-v 图、T-s 图及 h-s 图上的形式，归纳于表 1.1.4-25。

表1.1.4-25

过程	p-v 图	T-s 图	h-s 图
定容过程			
等压过程			
等温过程			
等熵过程			

6 湿空气

湿空气是干空气和水蒸汽的混合物。湿空气中水蒸汽的分压力很小，一般只有3000～4000 Pa，常处于过热状态，故可作为理想气体处理。

湿空气的压力为 $p=p_a+p_v$，通常在烘干、通风和空调等工程中都采用外界的大气作为工质，因此，湿空气的压力就是大气压力，即

$$p_b=p_b+p_v \tag{1.1.4-91}$$

式中：p_b——大气压力；

p_a——干空气分压力；

p_v——水蒸汽分压力。

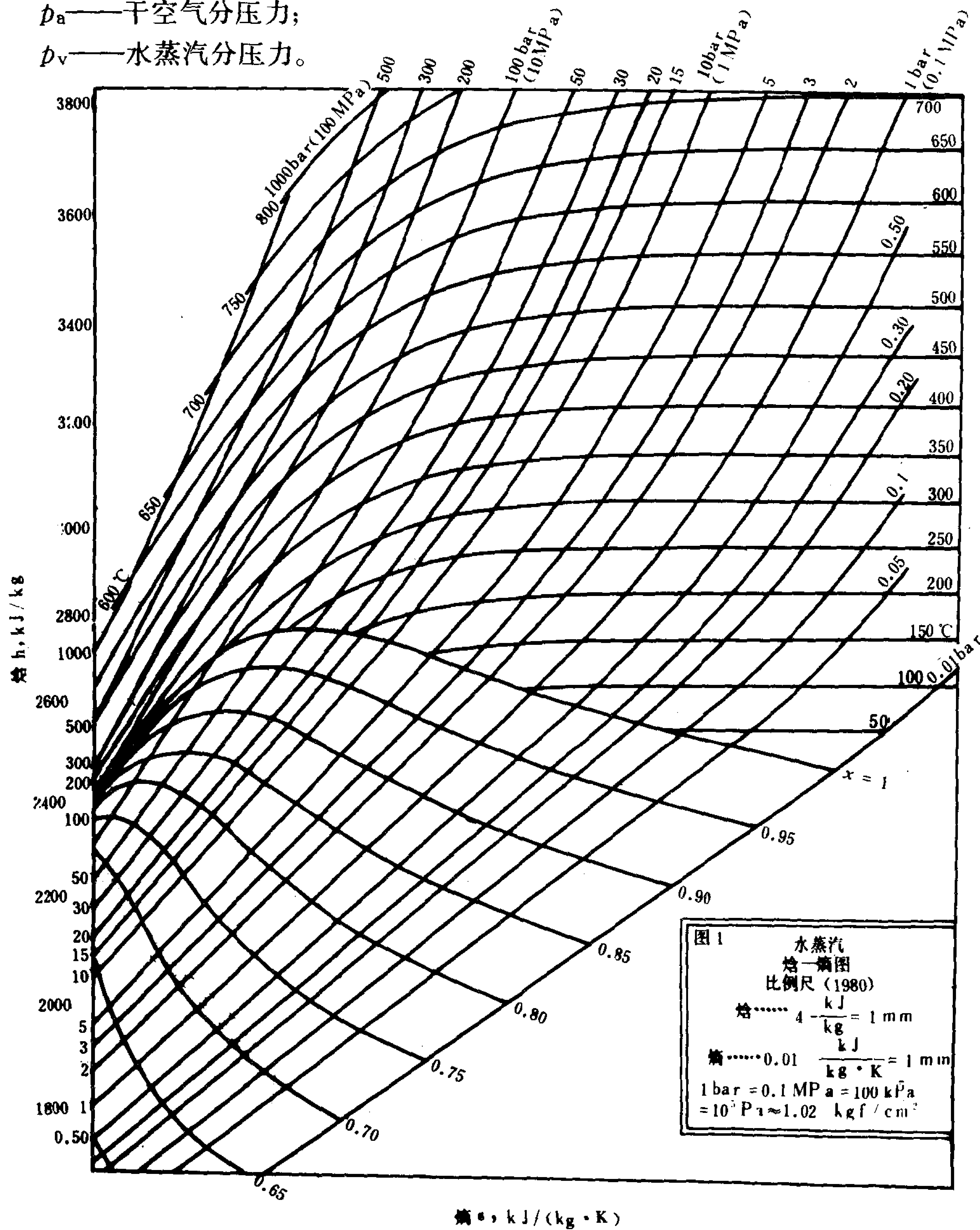


图 1.1.4-16 工程上用 h-s 图

6.1 湿饱和空气和露点

湿空气中的水蒸汽呈过热状态时，称为未饱和湿空气；如水蒸汽为饱和状态，则称为饱和湿空气。对未饱和湿空气，如水蒸汽的分压力不变，而使湿空气温度下降，则将使其中的水蒸汽达到饱和状态，成为饱和湿空气，此时的温度对应于水蒸汽分压力下的饱和温度，称为露点（温度）t_{DP}，如图 1.1.4-18 a)、b) 所示。露点可用湿度计或露点仪测量，测出 t_{DP} 也就相当于测出了湿空气中水蒸汽的分压力 p_v。

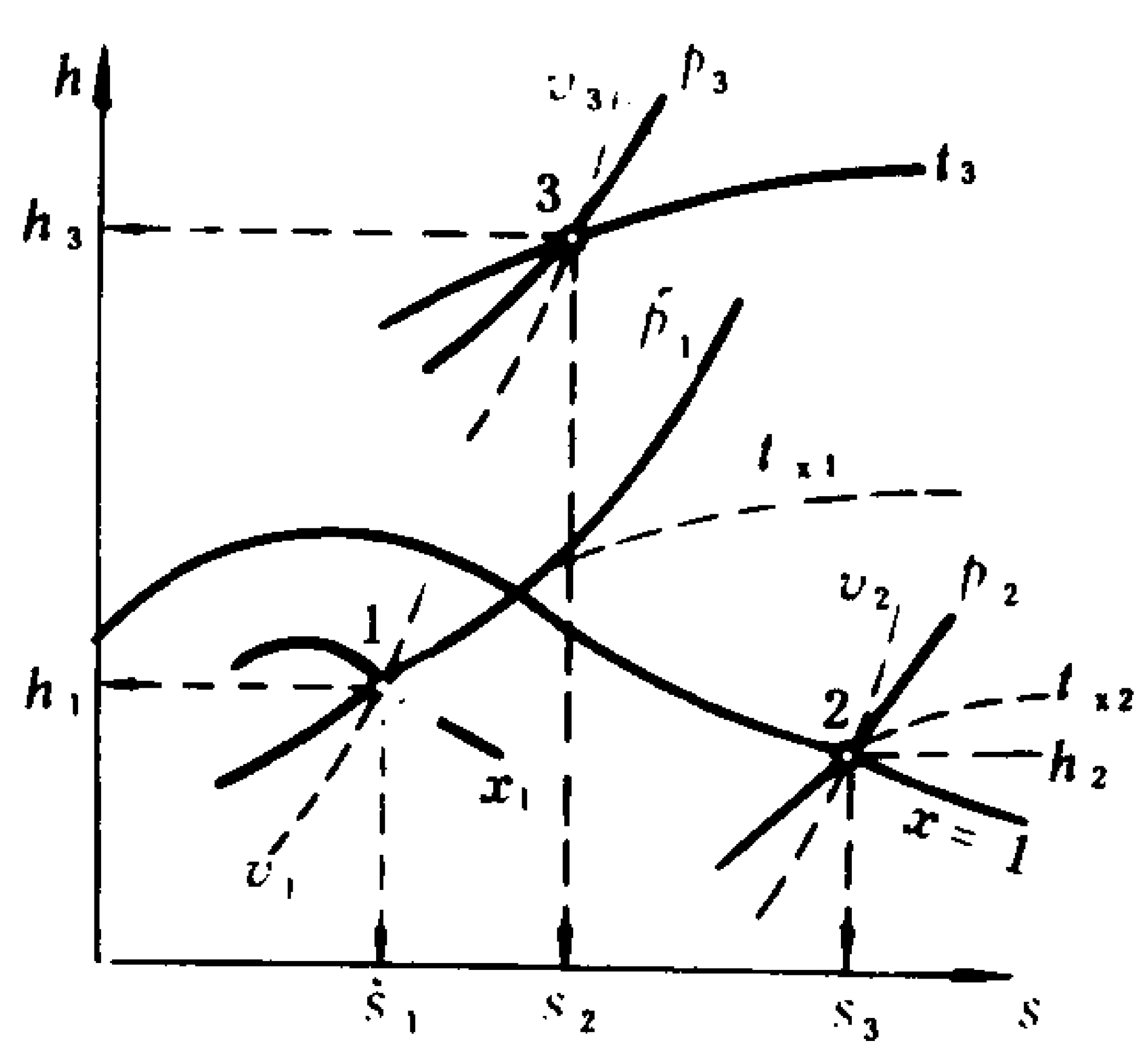


图 1.1.4-17 h-s 图的应用

6.2 湿空气的参数

1)绝对湿度和相对湿度

湿度是指湿空气中所含水蒸汽的分量。

(1)绝对湿度 ρ_v

每 1 m³湿空气中所含水蒸汽的质量 m_v (kg) 称为湿空气的绝对湿度。因其数值是在湿空气的温度 t 和水蒸汽的分压力 p_v 下水蒸汽的密度 ρ_v (kg/m³)，故可用 ρ_v 表示绝对湿度，即

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{1}{v_v} \quad (1.1.4\text{-}92)$$

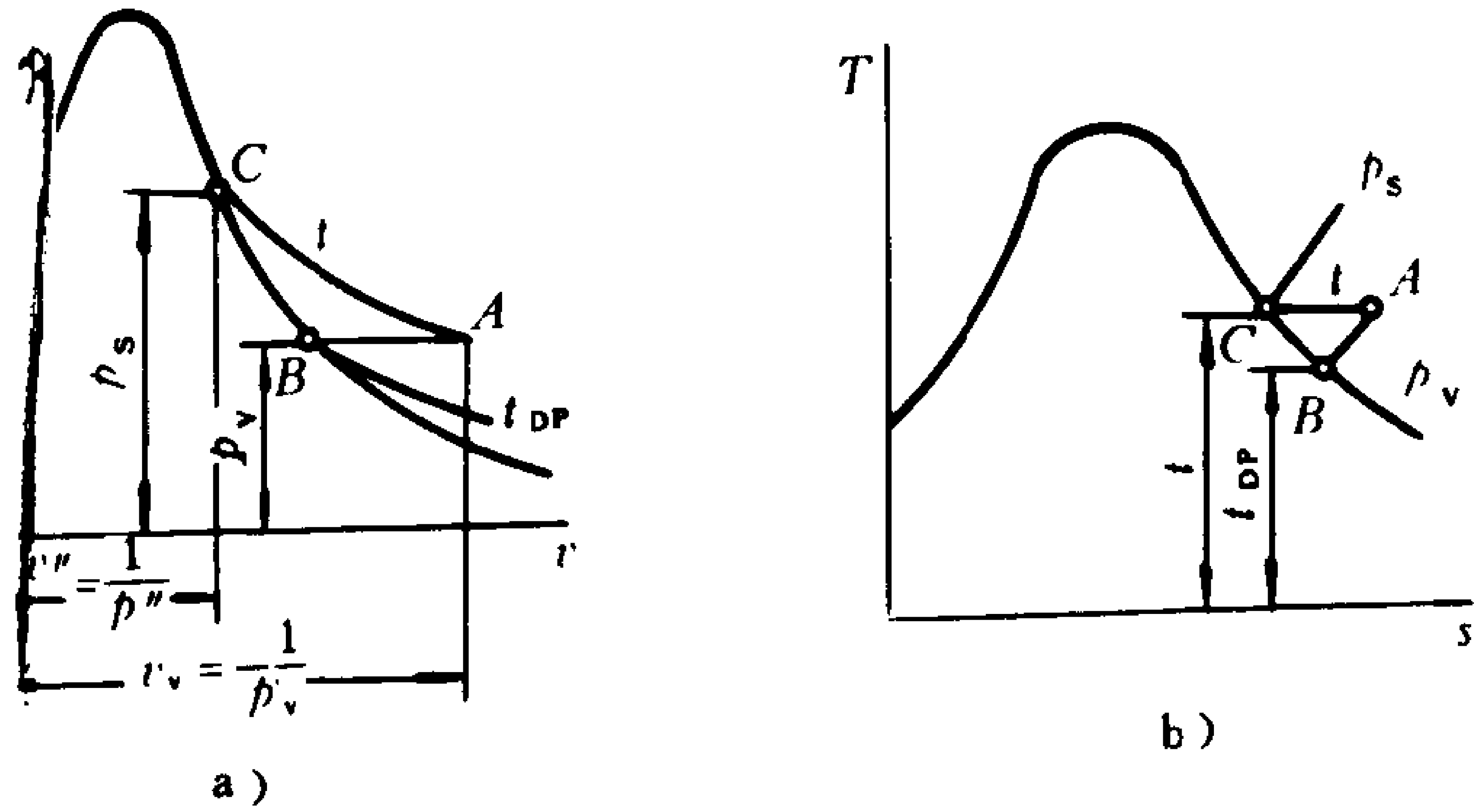


图 1.1.4-18 湿空气中水蒸汽状态

饱和湿空气的绝对湿度为

$$\rho'' = \frac{1}{v''} \quad (1.1.4\text{-}93)$$

(2)相对湿度 φ

湿空气中实际所含水蒸汽量与同温度下最大含水蒸汽量之比，称为相对湿度 φ。

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho''} \quad (1.1.4\text{-}94)$$

或

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \quad (1.1.4\text{-}95)$$

2)含湿量 d

与每千克干空气相混合的水蒸汽质量 (g)，称为含湿量或水份含量 d。

$$d = 1000\frac{m_v}{m_a} = 1000\frac{\rho_v}{\rho_a} \quad \text{(g/kg 干空气)} \quad (1.1.4\text{-}96)$$

式中：m_v——水蒸汽的质量；

m_a——干空气的质量。

由于水蒸汽和干空气处于混合状态，有共同的 V 和 T，它们的状态方程分别为

$$p_v V = m_v R_v T \quad m_v = \frac{p_v V}{R_v T}$$

$$p_a V = m_a R_a T \quad m_a = \frac{p_a V}{R_a T}$$

所以

$$d = 1000 \times \frac{m_v}{m_a} = 1000 \frac{p_v}{p_a} \times \frac{R_a}{R_v} = 1000 \times \frac{\mu_v}{\mu_a} \times \frac{p_v}{p_a}$$

将水蒸汽千摩尔质量 $m_v = 18.016$ kg/kmol，干空气千摩尔质量 $m_a = 28.97$ kg/kmol 代入上式得

$$d = 622 \frac{p_v}{p_a} \quad \text{g/kg干空气} \tag{1.1.4-97}$$

将大气压力 $p_b = p_v + p_a$或 $p_a = p_b - p_v$ 代入上式得

$$d = 622 \frac{p_v}{p_b - p_v} \quad \text{g/kg干空气}$$

因为 $p_v = \varphi p_s$，故

$$d = 622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s} \quad \text{g/kg干空气} \tag{1.1.4-98}$$

3)湿空气的焓

含湿量为 d 的湿空气的焓，是 1 kg干空气的焓和 $0.001d$ kg 水蒸汽焓的总和，即

$$h = h_a + 0.001 d h_v \quad \text{KJ/kg干空气} \tag{1.1.4-99}$$

式中：h_a——1 千克干空气的焓；

h_v——1 千克水蒸汽的焓。

如取干空气定压比热 $c_{pa} = 1.005$ kJ/（kg · K）

及水蒸汽焓的经验公式

$$h_v = 2501 + 1.86t \quad \text{kJ/kg水蒸汽}$$

代入上式，则湿空气的焓为

$$h = 1.005t + 0.001d\,(2501 + 1.86t) \quad \text{kJ/kg干空气} \tag{1.1.4-100}$$

式中：t——干球温度（℃）。

6.3 湿空气的焓一湿图（h-d图）

湿空气的 h-d 图是根据式（1.1.4-98）和（1.1.4-100）绘制成的，如图 1.1.4-20 所示。

图 1.1.4-19 可供工程上计算用。

焓湿图（h-s图）应用举例。

工程上常对湿空气进行加热或冷却，如图 1.1.4-21 所示。对湿空气单纯地加热或冷却的过程，其特点是过程中含湿量保持不变，在加热过程中，湿空气吸热温度升高，焓增加，含湿量不变，而相对湿度降低了，如图中 1-2 所示。冷却过程 1′-2′与加热过程正好相反。从图中可以确定过程中吸收或放出的热量为

$$q = \Delta h = h_2 - h_1$$

式中：h_1——湿空气初态的焓；

h_2——湿空气终态的焓。

空气温度℃

空气 $h-d$ 图

($P_b = 1$ bar SI)

含湿量 d g/kg 干空气

图 1.1.4-20 湿空气的焓-湿图

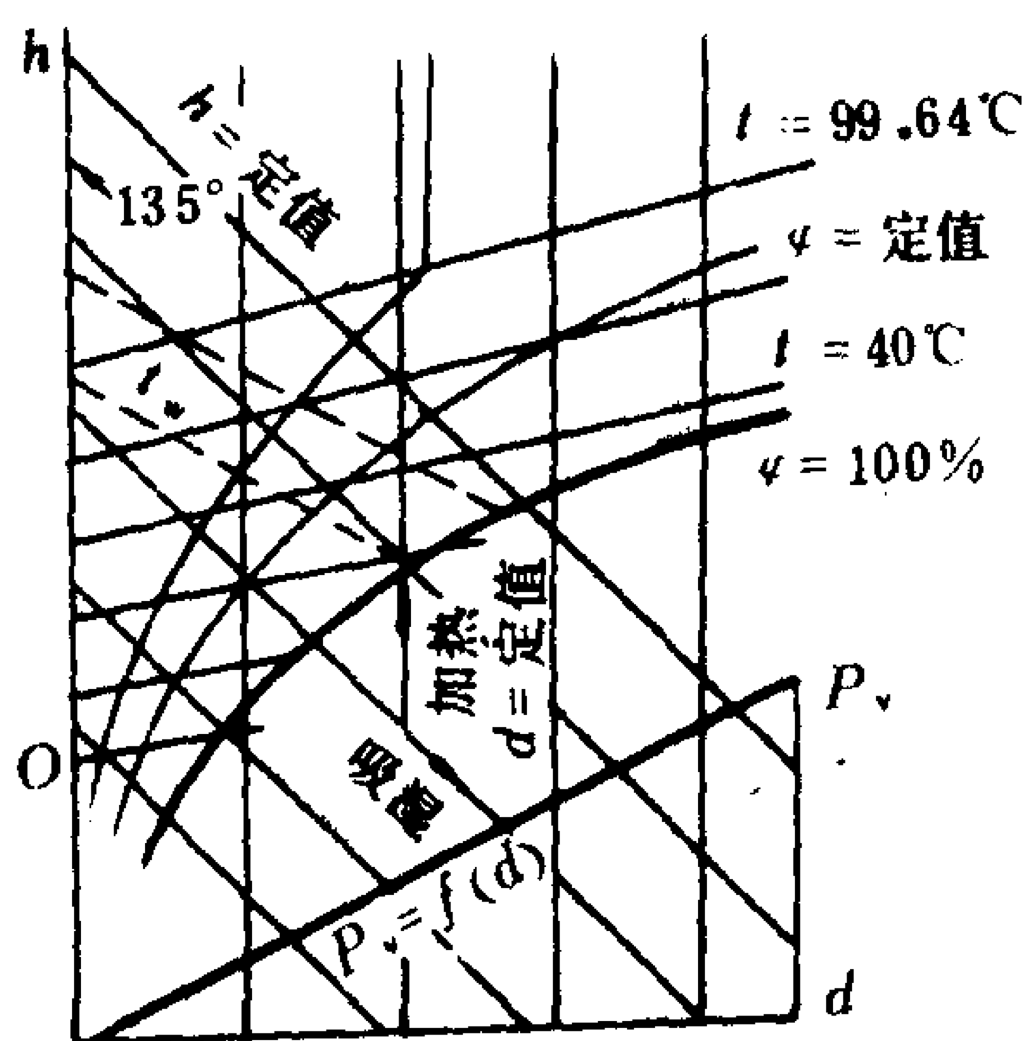
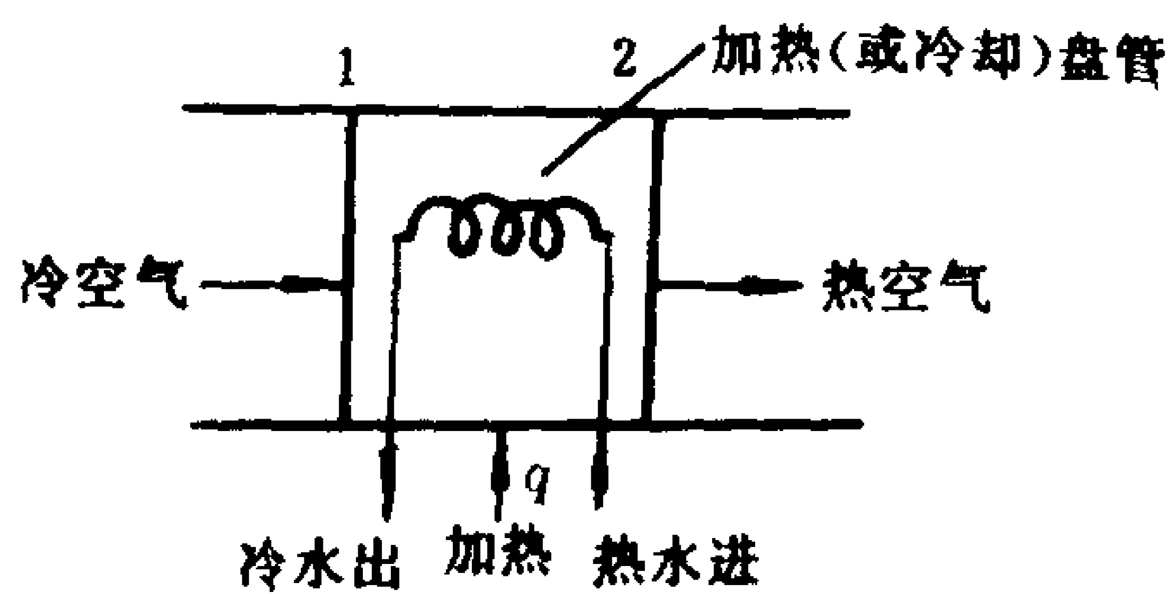


图 1.1.4-19 空气 h-d 图



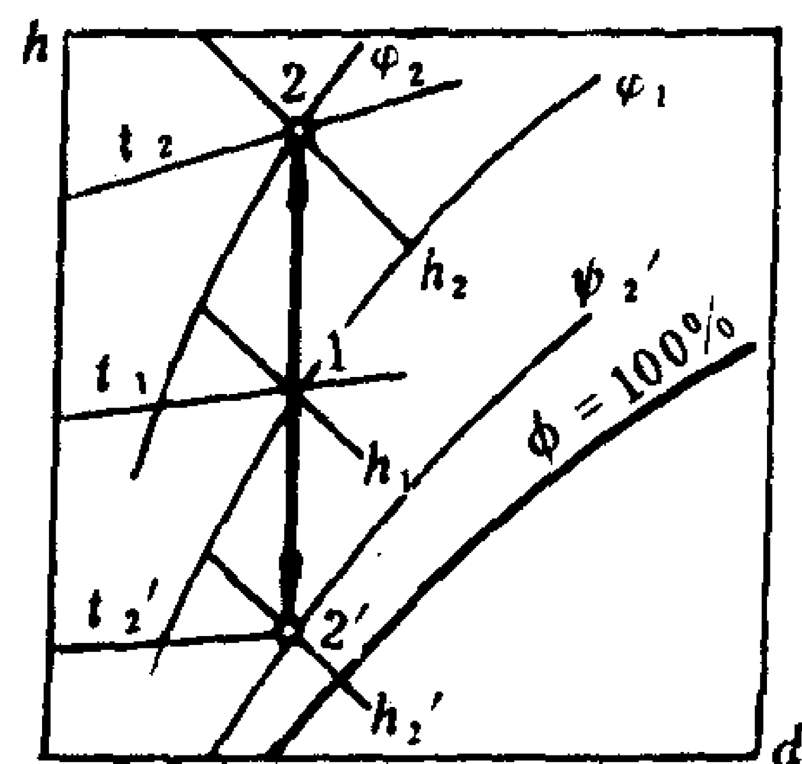


图 1.1.4-21 加热（或冷却）过程

表 1.1.4-26 给出 0.1 MPa 时饱和空气状态参数值。

表 1.1.4-26 0.1 MPa 时的饱和空气状态参数表

干球温度 t (℃)	水蒸汽压力 p_{sat} (10^2Pa)	含湿量 d_{sat} (g/kg)	饱和焓 h_{sat} (kJ/kg)	密度 ρ (kg/m³)	汽化热 r (kJ/kg)
−20	1.03	0.64	−18.5	1.38	2839
−19	1.13	0.71	−17.4	1.37	2839
−18	1.25	0.78	−16.4	1.36	2839
−17	1.37	0.85	−15.0	1.36	2838
−16	1.50	0.94	−13.8	1.35	2838
−15	1.65	1.03	−12.5	1.35	2838
−14	1.81	1.13	−11.3	1.34	2838
−13	1.98	1.23	−10.0	1.34	2838
−12	2.17	1.35	−8.7	1.33	2837
−11	2.37	1.48	−7.4	1.33	2837
−10	2.59	1.62	−6.0	1.32	2837
−9	2.83	1.77	−4.6	1.32	2836
−8	3.09	1.93	−3.2	1.31	2836
−7	3.38	2.11	−1.8	1.31	2836
−6	3.68	2.30	−0.3	1.30	2836
−5	4.01	2.50	+1.2	1.30	2835
−4	4.37	2.73	+2.8	1.29	2835
−3	4.75	2.97	+4.4	1.29	2835
−2	5.17	3.23	+6.0	1.28	2834
−1	5.62	3.52	+7.8	1.28	2834
0	6.11	3.82	9.5	1.27	2500
1	6.56	4.11	11.3	1.27	2498
2	7.05	4.42	13.1	1.26	2496
3	7.57	4.75	14.9	1.26	2493
4	8.13	5.10	16.8	1.25	2491
5	8.72	5.47	18.7	1.25	2489
6	9.35	5.87	20.7	1.24	2486
7	10.01	6.29	22.8	1.24	2484
8	10.72	6.74	25.0	1.23	2481
9	11.47	7.22	27.2	1.23	2479
10	12.27	7.73	29.5	1.22	2477
11	13.12	8.27	31.9	1.22	2475
12	14.01	8.84	34.4	1.21	2472
13	15.00	9.45	37.0	1.21	2470
14	15.97	10.10	39.5	1.21	2468
15	17.04	10.78	42.3	1.20	2465
16	18.17	11.51	45.2	1.20	2463
17	19.36	12.28	48.2	1.19	2460
18	20.62	13.10	51.3	1.19	2458
19	21.96	13.97	54.5	1.18	2456
20	23.37	14.88	57.9	1.18	2453
21	24.85	15.85	61.4	1.17	2451
22	26.42	16.88	65.0	1.17	2448
23	28.08	17.97	68.8	1.16	2446
24	29.82	19.12	72.8	1.16	2444
25	31.67	20.34	76.9	1.15	2441
26	33.60	21.63	81.3	1.15	2439
27	35.64	22.99	85.8	1.14	2437
28	37.78	24.42	90.5	1.14	2434

续上表

干球温度 t（℃）	水蒸汽压力 p_{sat}（10^2Pa）	含湿量 d_{sat}（g/kg）	饱和焓 h_{sat}（kJ/kg）	密度 ρ（kg/m³）	汽化热 r（kJ/kg）
29	40.04	25.94	95.4	1.14	2432
30	42.41	27.52	100.5	1.13	2430
31	44.91	29.25	106.0	1.13	2427
32	47.53	31.07	111.7	1.12	2425
33	50.29	32.94	117.6	1.12	2422
34	53.18	34.94	123.7	1.11	2420
35	56.22	37.05	130.2	1.11	2418
36	59.40	39.28	137.0	1.10	2415
37	62.74	41.64	144.2	1.10	2413
38	66.24	44.12	151.6	1.09	2411
39	69.91	46.75	159.5	1.08	2408
40	73.75	49.52	167.7	1.08	2406
41	77.77	52.45	176.4	1.08	2403
42	81.98	55.54	185.5	1.07	2401
43	86.39	58.82	195.0	1.07	2398
44	91.00	62.26	205.0	1.06	2396
45	95.82	65.92	218.6	1.05	2394
46	100.85	69.76	226.7	1.05	2391
47	106.12	73.84	238.4	1.04	2389
48	111.62	78.15	250.7	1.04	2386
49	117.36	82.70	263.6	1.03	2384
50	123.35	87.52	277.3	1.03	2382
51	128.60	92.62	291.7	1.02	2379
52	136.13	98.01	306.8	1.02	2377
53	142.93	103.73	322.9	1.01	2375
54	150.02	109.80	339.8	1.00	2372
55	157.41	116.19	357.7	1.00	2370
56	165.09	123.00	376.7	0.99	2367
57	173.12	130.23	396.8	0.99	2365
58	181.46	137.89	418.0	0.98	2363
59	190.15	146.04	440.6	0.97	2360
60	199.17	154.72	464.5	0.97	2358
65	250.10	207.44	609.2	0.93	2345
70	311.60	281.54	811.1	0.90	2333
75	385.50	390.20	1105.7	0.85	2320
80	473.60	559.61	1563.0	0.81	2309
85	578.00	851.90	2351.0	0.76	2295
90	701.10	1459.00	3983.0	0.70	2282
95	845.20	3396.00	9190.0	0.64	2269
100	1013.00			0.60	2257

6.4 干球温度 t 和湿球温度 t_d

用普通温度计测得的湿空气温度，称为干球温度 t；用湿纱布包裹温度计的温包所测得的湿空气温度，称为湿球温度 t_d。对饱和空气，干、湿球温度彼此相等，对未饱和空气，由于湿包表面产生水蒸发，因此，湿球温度低于干球温度。干、湿球温度差的大小与空气的相对湿度 φ 有关，所以可利用干、湿球温度差来求空气的相对湿度 φ，见表 1.1.4-27。

表 1.1.4-27　　**风速 2.5 m/s 下相对湿度 φ% 与干球、湿球温度的关系**

湿球温度 ℃	干湿球温度差 $t-t_d$（℃）															
	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
0①	100	80	63	50	37	28	20	13	8	4	1	1				
2	100	82	66	53	42	33	25	19	14	10	6	4	2	1		
4	100	83	69	56	46	37	30	24	19	14	11	9	7	5	4	3
6	100	84	71	59	49	41	34	28	23	19	15	13	11	9	8	7
8	100	85	73	62	52	44	37	32	27	23	19	16	14	12	11	10
10	100	86	74	64	55	47	41	35	30	26	23	20	17	15	14	12
12	100	87	76	66	57	50	43	38	33	29	26	22	20	18	16	15
14	100	88	77	68	59	52	46	40	36	32	28	25	22	20	18	17
16	100	88	78	69	61	54	48	43	38	34	30	27	25	22	20	19
18	100	89	79	70	63	56	50	45	40	36	32	29	27	24	22	20
20	100	89	80	72	64	58	52	47	42	38	34	31	28	26	24	22
22	100	90	81	73	66	59	53	48	44	40	36	33	30	28	25	23
24	100	90	82	74	67	60	55	50	45	41	37	34	31	29	27	
26	100	91	82	75	68	62	56	51	47	43	39	36	33	30	28	
28	100	91	83	75	69	63	57	52	48	44	40	37	34	31	29	
30	100	91	83	76	70	64	58	53	49	45	41	38				
32	100	91	84	77	70	65	59	54	50	46	42	39				
34	100	92	84	77	71	65	60	55	51	47	43	40				

① 湿球不结冰。

7　气体的基本热力过程

系统状态连续变化的所经历的全部状态称为热力过程。

理想气体的 4 种典型热力过程为定容、等压、等温及等熵（可逆绝热）过程，如图 1.1.4-22 所示。研究热力过程的目的在于由已知状态和过程方程，计算过程中工质的状态变化和能量交换（作功、传热），并将过程表示在 p-v 图和 T-s 图中。

表 1.1.4-28 归纳了基本热力过程的有关计算公式。

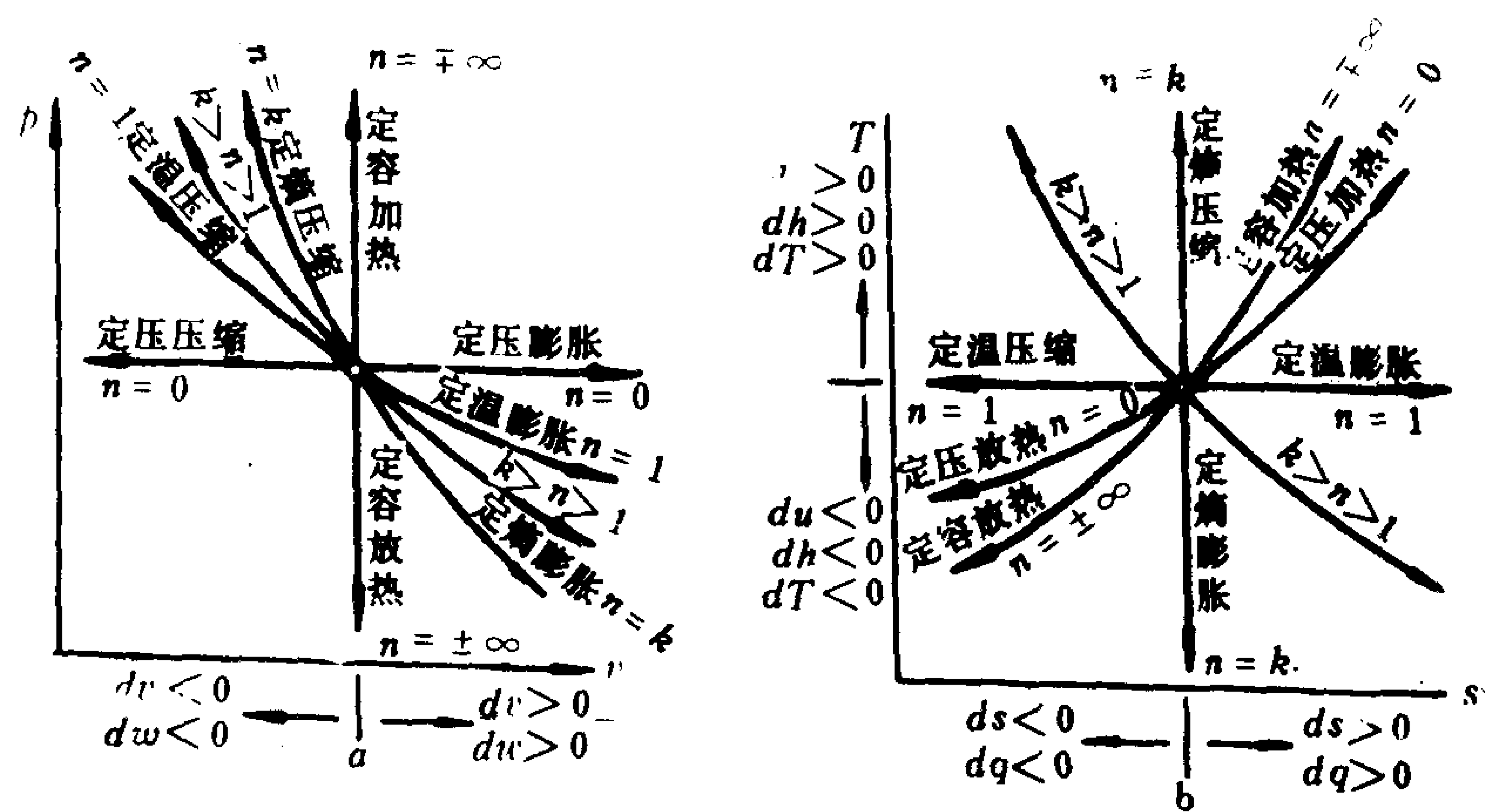


图 1.1.4-22　气体基本热力过程

表 1.1.4-28 理想气体可逆过程计算公式表

项目 ＼ 多变指数 ＼ 过程	定容过程	定压过程	定温过程	绝热（定熵）过程	多变过程
	$n=\pm\infty$	$n=0$	$n=1$	$n=k$	$-\infty<n<\infty,(n\neq1)$
过程方程	$v=$定值	$p=$定值	$pv=$定值	$pv^k=$定值	$pv^n=$定值
基本状态参数关系式	$\frac{p_2}{p_1}=\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{v_2}{v_1}=\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{p_1}{p_2}=\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{p_2}{p_1}=\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$, $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$, $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$\frac{P_2}{p_1}=\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$, $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$, $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$
Δu、Δh、Δs 计算式	$\Delta u=c_v(T_2-T_1)$ $\Delta h=c_p(T_2-T_1)$ $\Delta s_v=c_v\ln\frac{T_2}{T_1}$	$\Delta u=c_v(T_2-T_1)$ $\Delta h=c_p(T_2-T_1)$ $\Delta s_p=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}$	$\Delta u=0$ $\Delta h=0$ $\Delta s_T=R\ln\frac{v_2}{v_1}$ $=R\ln\frac{p_1}{p_2}$	$\Delta u=c_v(T_2-T_1)$ $\Delta h=c_p(T_2-T_1)$ $\Delta s=0$	$\Delta u=c_v(T_2-T_1)$ $\Delta h=c_p(T_2-T_1)$ $\Delta s=c_v\ln\frac{T_2}{T_1}+R\ln\frac{v_2}{v_1}$ $=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}-R\ln\frac{p_2}{p_1}$ $=c_p\ln\frac{v_2}{v_1}+c_v\ln\frac{p_2}{p_1}$
膨胀功 $w=\int_1^2 pdv$	$w_v=0$	$w_p=p(v_2-v_1)$ $=R(T_2-T_1)$	$w_T=RT\ln\frac{v_2}{v_1}$ $=RT\ln\frac{p_1}{p_2}$	$w_s=-\Delta u$ $=\frac{1}{k-1}(p_1v_1-p_2v_2)$ $=\frac{1}{k-1}R(T_1-T_2)$ $=\frac{1}{k-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$	$w_n=\frac{1}{n-1}(p_1v_1-p_2v_2)$ $=\frac{1}{n-1}R(T_1-T_2)$ $=\frac{1}{n-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$
技术功 $w_t=\int_1^2 -vdp$		$w_{t,p}=0$	$w_{t,T}=wT$	$w_{t,p}=-\Delta h$ $=\frac{k}{k-1}(p_1v_1-p_2v_2)$ $=\frac{k}{k-1}R(T_1-T_2)$ $\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$	$w_{t,n}=\frac{n}{n-1}(p_1v_1-p_2v_2)$ $=\frac{n}{n-1}R(T_1-T_2)$ $=\frac{n}{n-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$
热量 $q=\int_1^2 cdT=\int_1^2 Tds$	$q_v=\Delta u_v=c_v(T_2-T_1)$	$q_p=\Delta h_p=c_p(T_2-T_1)$	$q_p=T\Delta s_T=w_T=w_{t,T}$	$q=0$	$q_n=\frac{n-k}{n-1}c_v(T_2-T_1)$
过程比热	c_v	c_p	∞	0	$c=\frac{n-k}{n-1}c_v$
p-v 图上过程线斜率	$\frac{dp}{dv}=\pm\infty$	$\frac{dp}{dv}=0$	$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T=\frac{-p}{v}$	$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s=-k\frac{p}{v}$	$\frac{dp}{dv}=-n\frac{p}{v}$
T-s 图上过程线斜率	$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v=\frac{T}{c_v}$	$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p=\frac{T}{c_p}$	$\frac{dT}{ds}=0$	$\frac{dT}{ds}=\pm\infty$	$\frac{dT}{ds}=\frac{T}{c}$

8　气体动力循环

气体动力循环是以装置气体或燃气作为工质。按循环工作性质的不同，可分为活塞式内燃机循环、叶轮式燃气轮机循环及喷气式推进机循环等三类。

理想的气体动力循环是从实际工作循环中简化抽象出来的。分析气体动力循环的目的在于找出提高循环热效率的途径。

8.1　内燃机理想循环

（1）定容加热循环

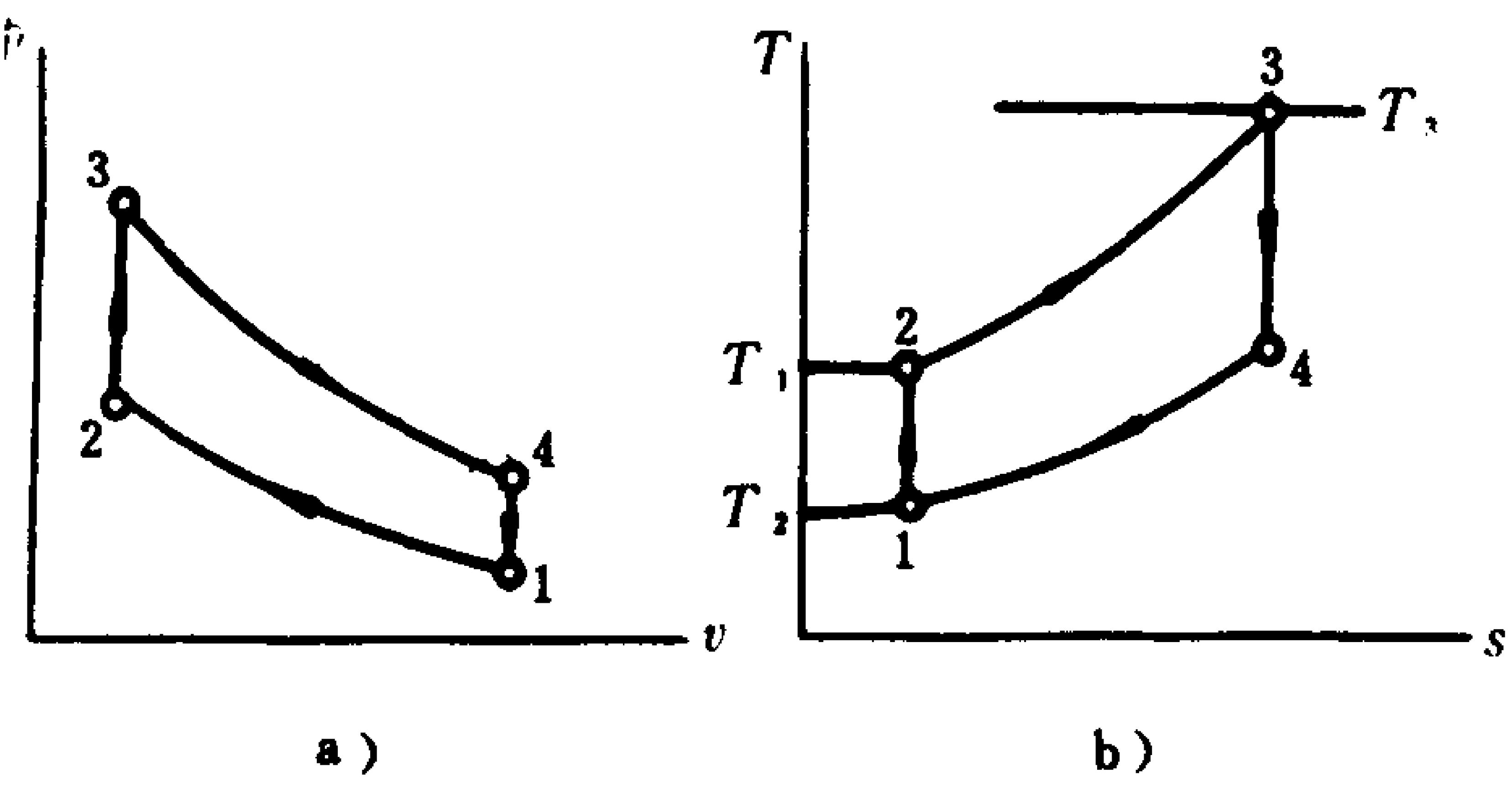


图 1.1.4-23　定容加热循环

定容加热循环也叫奥图循环，汽油机及煤气机就属于定容加热循环。图 1.1.4-23 为定容加热内燃机的理想循环 p-v 及 T-s 图。

定容加热循环的热效率为

$$\eta_t=1-\frac{q_2}{q_1}=1-\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (1.1.4\text{-}101)$$

式中：$\varepsilon=\frac{v_1}{v_2}$——压缩比；

k——燃烧气体的比热比。

从上式可见，定容加热循环的热效率与压缩比有关，且热效率随 ε 的增大而提高。但由于压缩的是空气和汽油的可燃混合气，如果压缩比 ε 太高，将会产生“爆燃”，导致热效率的降低和影响发动机的正常运行和寿命，这就限制了 ε 和 η_t 的提高。ε 值视燃料的性质而异，对气体燃料，ε 可大些，汽油则小些。实际汽油机和煤气机的压缩比一般在 6～10 范围内变化。图 1.1.4-24 给出了各种数值 ε 和 k 时 η_t 的值。这类内燃机由于压缩比相对较小，因此循环的热效率较低。

（2）等压加热循环

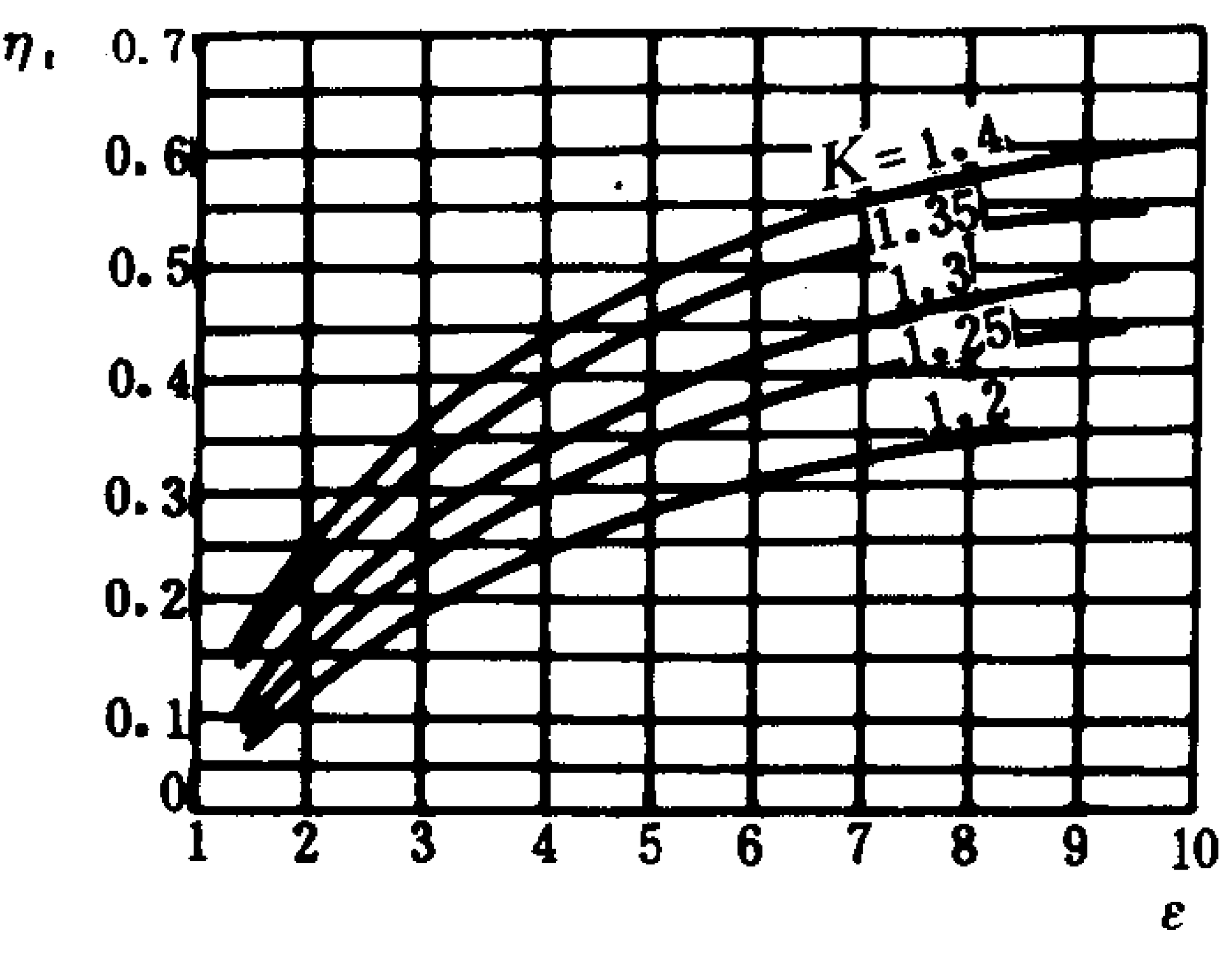


图 1.1.4-24　ε 及 k 对 η_t 关系

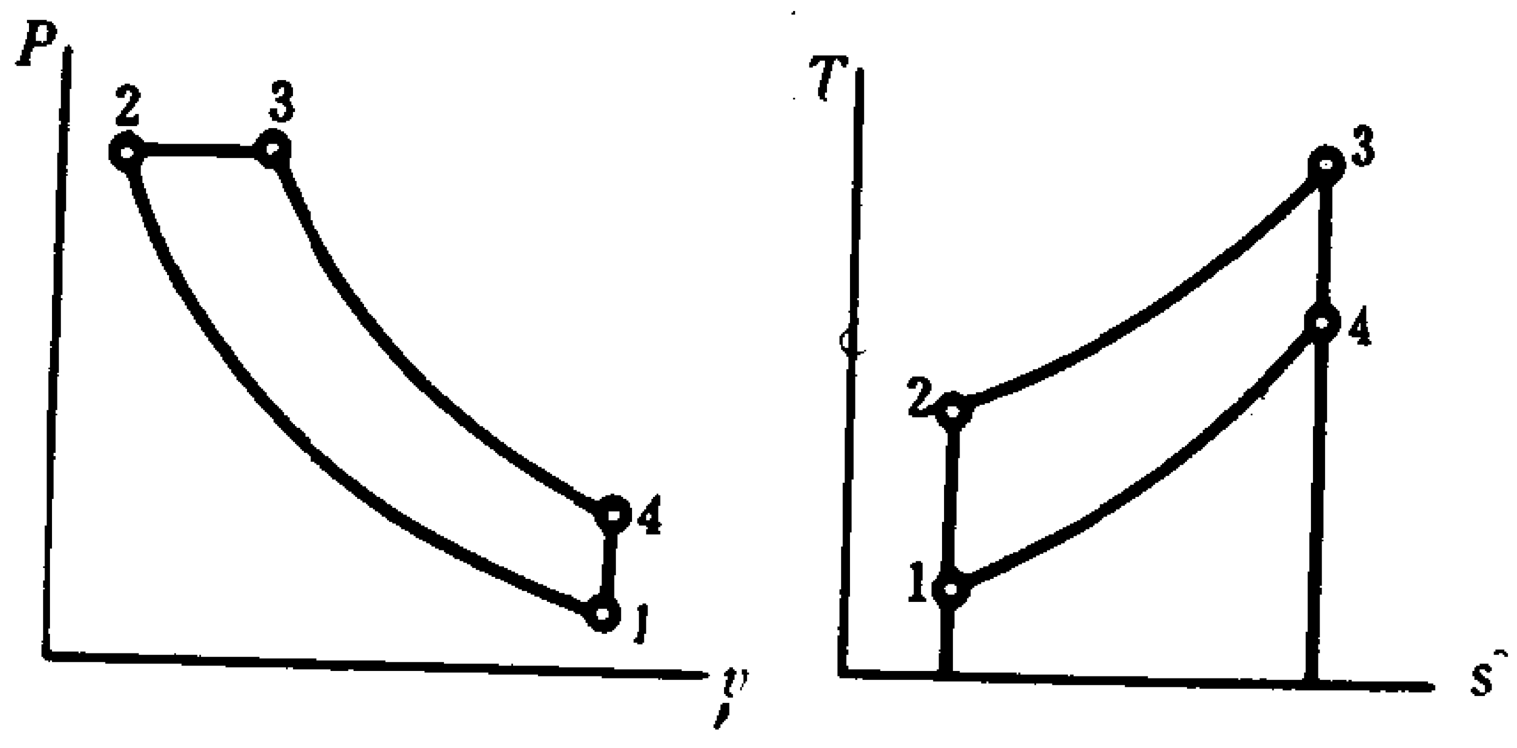


图 1.1.4-25　定压加热循环

等压加热循环也称狄塞尔循环。图 1.1.4-25 表示等压加热理想循环的p-v图和T-s图。

等压加热循环的的热效率为

$$\eta_t=1-\frac{\rho^k-1}{\varepsilon^{k-1}k(\rho-1)} \tag{1.1.4-102}$$

式中：ρ——预胀比，$\rho=\frac{v_4}{v_3}$。

上式说明，等压加热理想循环的热效率 η_t 随 ε 的增大而提高，随 ρ 的增大而降低。当 ε 不变时，ρ 减小，即等压加热量 q_1 减小，η_t 随之提高；反之，η_t 降低。这是因为活塞行程既定，在等压加热过程的后期加入的热量愈多，在绝热膨胀过程中未能充分转换为功而排走的部分也愈多了。图 1.1.4-26 列出各种 ε 值和 ρ 值时的η_t（k=1.35）。

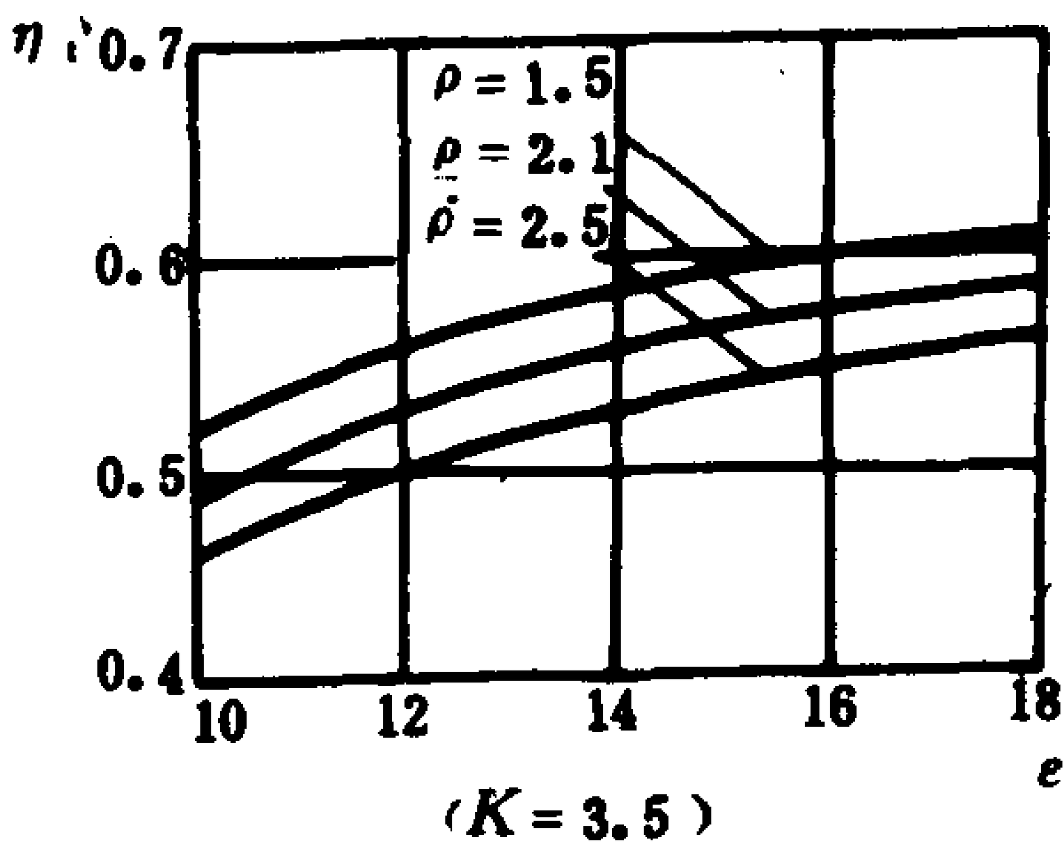


图 1.1.4-26 ε、ρ 对 η_t 关系

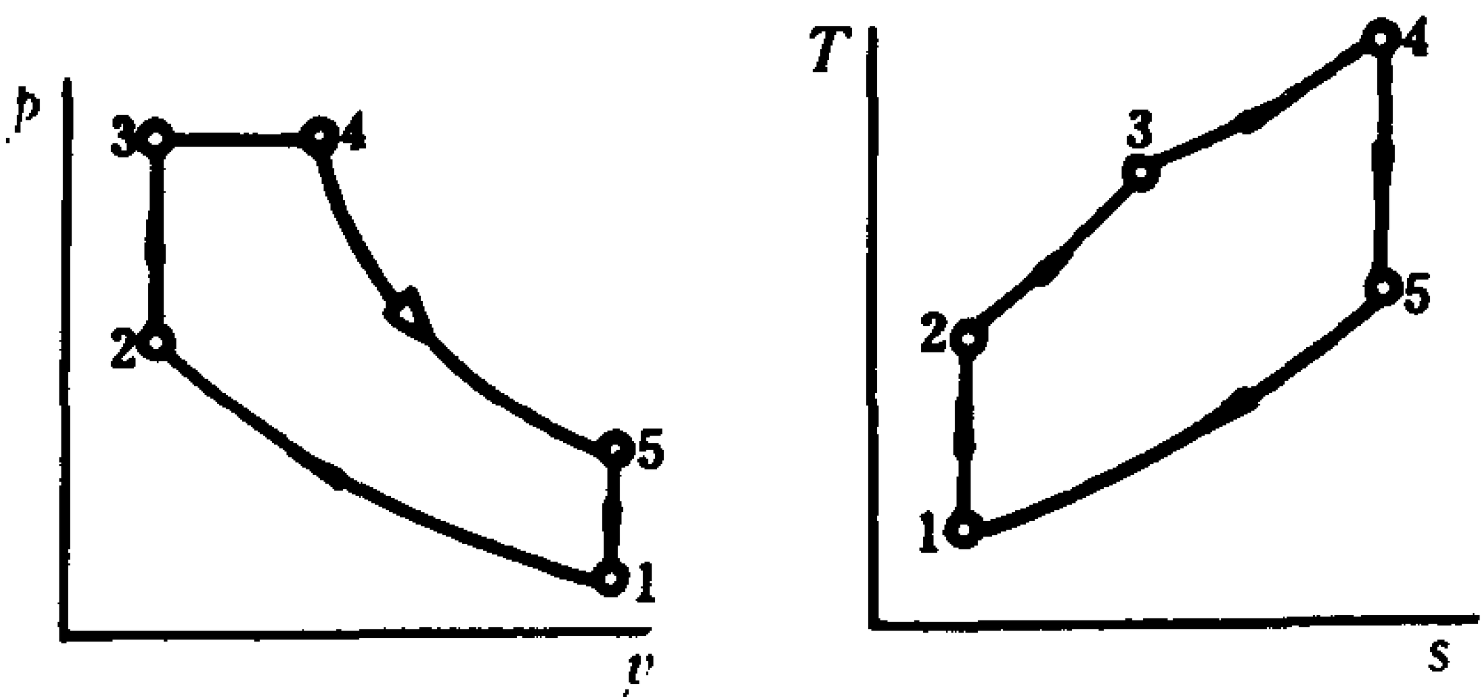


图 1.1.4-27 混合加热循环

（3）混合加热循环

混合加热循环简称混合循环，它是现代柴油机实际工作循环的理想循环，图 1.1.4-27 是混合加热理想循环的 p-v 图和 T-s 图。

其循环热效率为

$$\eta_t=1-\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\cdot\frac{\lambda\rho^k-1}{[(\lambda-1)+k\lambda(\rho-1)]} \tag{1.1.4-103}$$

式中：λ——压力升高比，$\lambda=\frac{p_3}{p_2}$。

上式结果说明，混合加热循环的热效率 η_t 随压缩比 ε 和压力升高比 λ 两者的增大而提高，随预胀比 ρ 的增大而降低。当 ε 和每一循环加热量 q_1 不变时，增大 λ，则 ρ 相应减小，能使循环热效率 η_t 提高，这是因为增加了在定容加热过程的加热量，使这部分热量在绝热膨胀过程中得到较充分地转换为功。

表 1.1.4-29 列出了活塞式内燃机的有效效率。

表 1.1.4-29 活塞式内燃机的有效效率

发动机型式	有效效率 η_e	压缩比 ε
按定容加热循环工作发动机		
气体燃料式 化油器式	0.25～0.30 0.25～0.32	6～8 7～10

续上表

发动机型式	有效效率 η_e	压缩比 ε
按混合加热循环工作发动机		
低速	0.40～0.53	14～24
中速	0.38～0.45	14～22
高速	0.36～0.40	14～20

8.2 热气机循环

活塞式热气发动机又称斯特林发动机。它是一种外部加热的闭式循环发动机，气缸内部充有一定质量的工质，如空气、氮气和氦气等。由于它是外燃机，可采用廉价易得的燃料，也可用太阳能，因此它排气污染小，噪声低，可采用多种燃料，较之其它发动机有其优越性。70 年代起，国内外都在研制斯特林发动机。

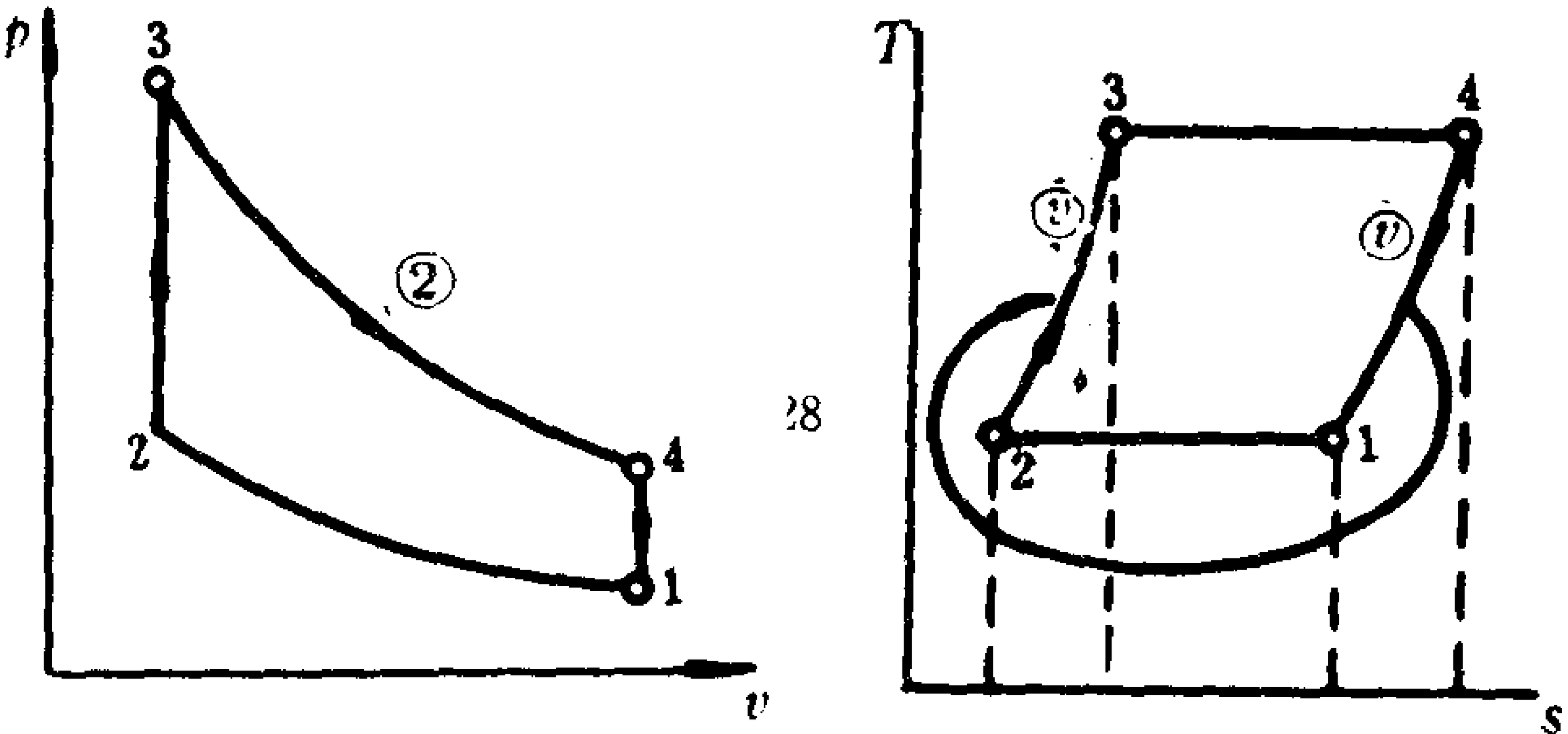


图 1.1.4-28 斯特林理论循环

图 1.1.4-28 是斯特林理想循环在 p-v 图和 T-s 图的表示。1-2 为定温压缩过程；2-3 为定容吸热过程；3-4 为定温膨胀对外作功过程；4-1 为定容放热过程。在极限回热时，定容放热过程 4-1 放出的热量正好为定容吸热过程 2-3 所吸收。在 T-s 图上面积 1-4-r-l-1 等于面积 2-3-n-m-2，这样，循环只在定温膨胀过程 3-4 从热源吸热，在定温压缩过程 1-2 向冷源放热。因此，斯特林理论循环即为概括性卡诺循环，在理论上，其热效率等于在相同热源和冷源温限下的卡诺循环热效率。

斯特林理想循环热效率为

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{RT_1 ln\frac{v_1}{v_2}}{RT_3 ln\frac{v_4}{v_3}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \tag{1.1.4-104}$$

斯特林循环在理论上其热效率很高，但由于实际工作循环中的种种原因，目前斯特林发动机

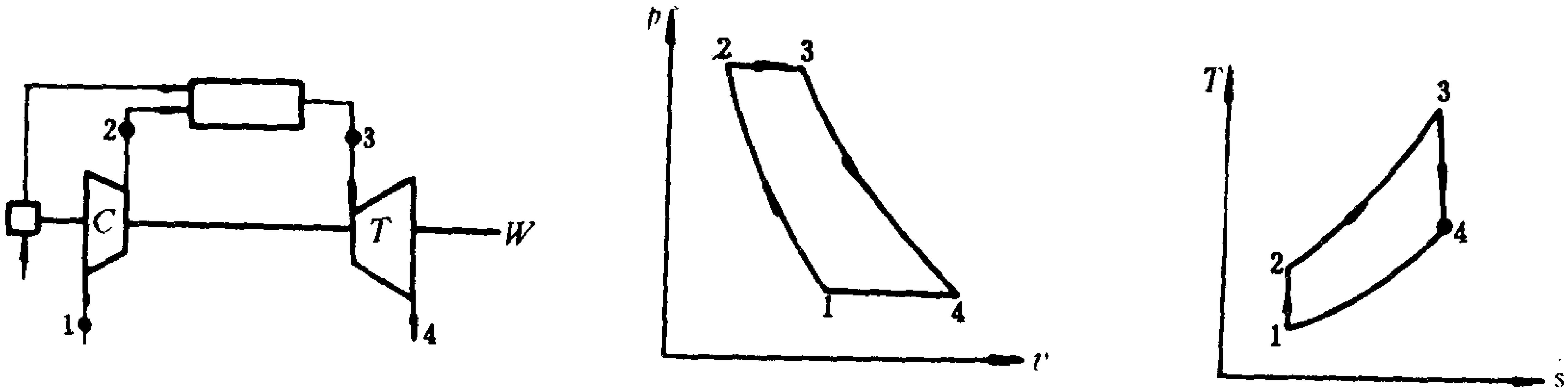


图 1.1.4-29 燃气轮机装置定压加热循环

的循环热效率一般为32～40%。

8.3 燃气轮机装置定压加热循环

燃气轮机装置是一种以空气及燃气为工质的热力发动机。按其加热方式可分为定压加热循环和定容加热循环两种。

图1.1.4-29是简单燃气轮机装置定压加热理想循环的 p-v 图和 T-s 图。这种循环也叫布雷登循环。图中1-2为工质在压缩机中的可逆绝热压缩过程；2-3为工质在定压下的可逆吸热过程；3-4为工质在燃气轮机中的可逆绝热膨胀过程；4-1为工质排入大气进行放热。当工质定压冷却到初态1时，再由压缩机吸入，形成了一个封闭循环。

其理想循环热效率为

$$\eta_t=1-\frac{T_1}{T_2}=1-\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \quad (1.1.4\text{-}105)$$

上式结果表明，定压加热燃气轮机装置理想循环的热效率 η_t，随增压比 $\beta=\frac{p_2}{p_1}$ 的增加而提高，这是在假定压缩机和燃气机的绝热效率都是100%的情况下所导出的热效率公式。

为了找出每千克工质所作的循环净功（或叫比循环功）w_0 为最大，假定比热为定值，则

$$w_0=c_p(T_3-T_4)-c_p(T_2-T_1)$$

因为 $\frac{T_3}{T_4}=\frac{T_2}{T_1}=\beta^{\frac{k-1}{k}}$

并将 $T_4=\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}T_3$ 及 $T_2=\beta^{\frac{k-1}{k}}T_1$

代入得 $w_0=c_pT_1\left[\frac{T_3}{T_1}\left(1-\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\right)-\left(\beta^{\frac{k-1}{k}}-1\right)\right]$

令 $\tau=\frac{T_3}{T_1}$（τ 称循环增温比）则

$$w_0=c_pT_1\left(\beta^{\frac{k-1}{k}}-1\right)\left(\frac{\tau}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}-1\right) \quad (1.1.4\text{-}106)$$

上式说明了循环功 w_0 随增温比 τ 及增压比 β 的变化关系，为便于讨论，将上式写作无因次形式，即

$$\frac{w_0}{c_pT_1}=\left(\beta^{\frac{k-1}{k}}-1\right)\left(\frac{\tau}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}-1\right) \quad (1.1.4\text{-}107)$$

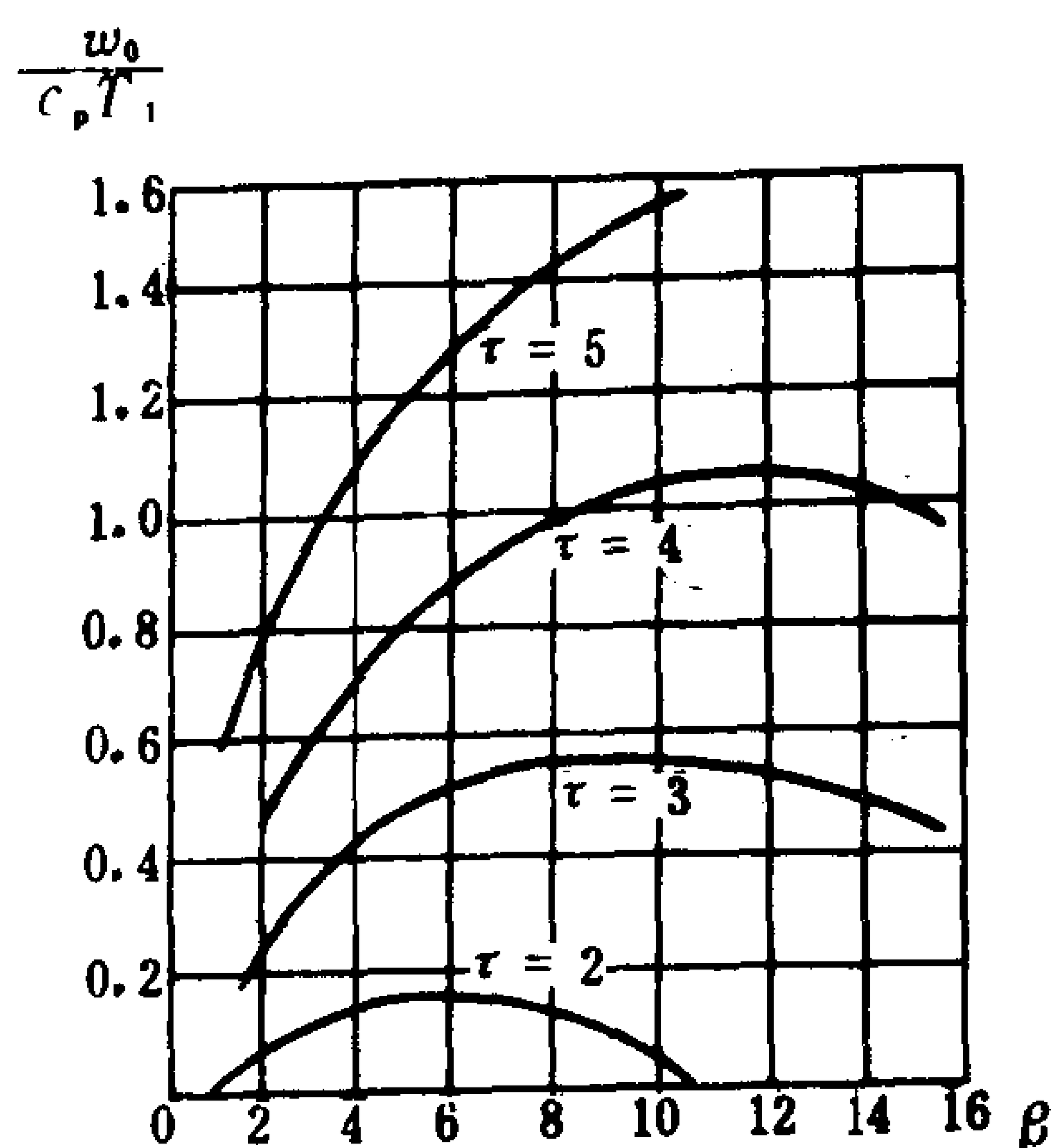


图1.1.4-30 $\frac{w_0}{c_pT_1}$、β、τ 之间关系曲线

图1.1.4-30给出了 $\frac{w_0}{c_pT_1}$、β、τ 之间的关系曲线。从图中可见，τ 一定时，w_0 随 β 的增大起初是增加的，达到最大值后，逐渐减小并趋向于零。对每一个确定的 τ 值，都有一个最大的循环功 w_{max}，这时对应的增压比 β_{max} 可由 $\frac{dw_0}{d\beta}=0$ 确定，即

$$\beta_{w_0 max}=\tau^{\frac{k}{2(k-1)}} \tag{1.1.4-108}$$

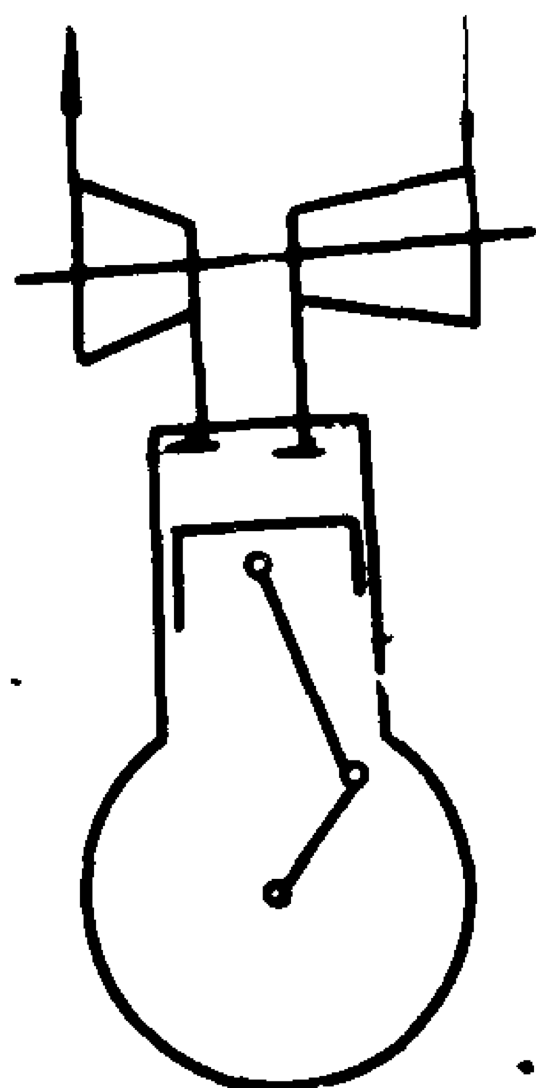


图 1.1.4-31

增压柴油机示意图

同时也可看出，τ 愈大则 $\beta_{w_0 max}$ 也愈大，最大循环功 w_{max} 也显著地增大。因此，在材料热强度允许的前提下尽可能提高 T_3，使循环功大幅度地增大，有利于提高燃机轮机装置的功率。

8.4 增压式内燃机及其循环

图 1.1.4-31 是废气涡轮增压柴油机的示意图。图 1.1.4-32 是废气涡轮增压柴油机理想循环的 p-v 图 和 T-s图。

图中 n-8 为工质进入压气机；8-1 在压气机中绝热压缩；1-m 为工质排出压气机；m-1 为工质进入柴油机；1-2 为绝热压缩；2-3、3-4 为在定容、定压下加热；4-5 为绝热膨胀；5-1 为工质排出柴油机；1-6 为工质经排气管入废气涡轮机；6-7 为绝热膨胀；7-8 为工质定压放热；8-n 为工质排出涡轮机。

其理论循环热效率为

$$\eta_t=1-\frac{1}{\varepsilon_S^{k-1}}\frac{[\lambda\rho^k+(k-1)]\left(\frac{\varepsilon_k}{\delta_T}\right)^{k-1}-k}{(\lambda-1)+k\lambda(\rho-1)} \tag{1.1.4-109}$$

式中：$\varepsilon_k=\frac{v_8}{v_1}$——增压器压缩比；

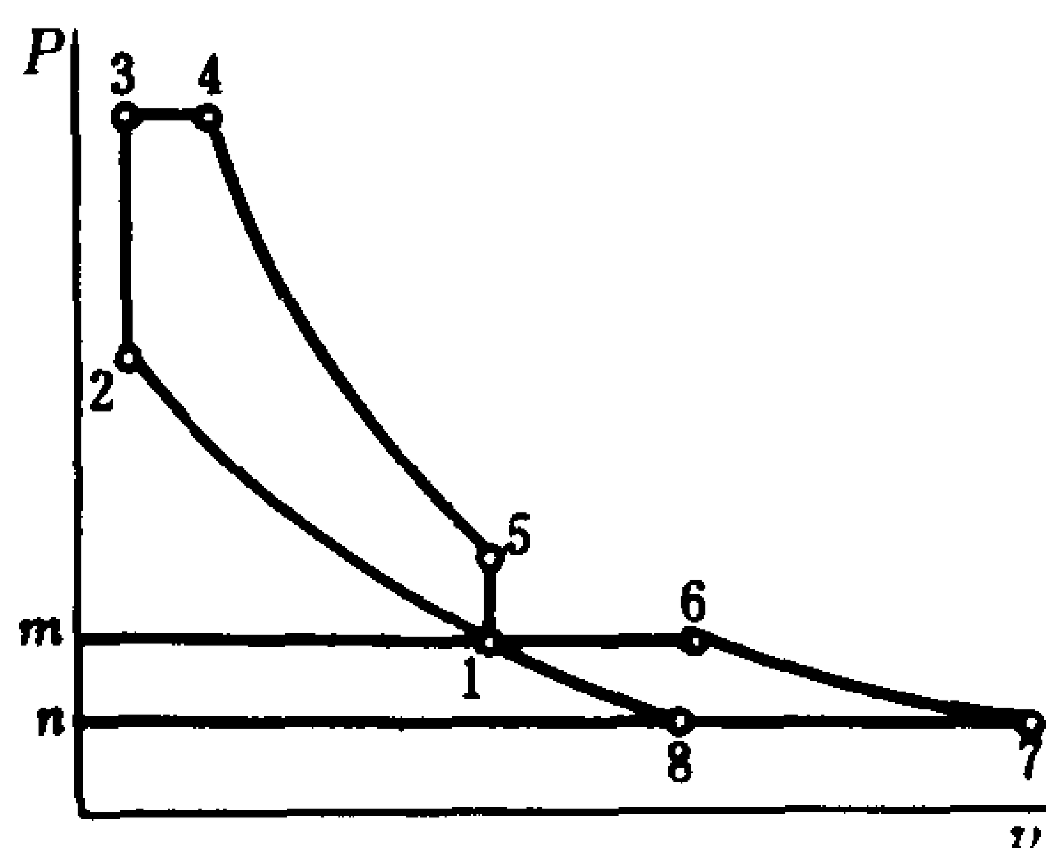
$\delta_T=\frac{v_7}{v_6}$——涡轮机膨胀比；

$\lambda=\frac{p_3}{p_2}$——柴油机压力升高比；

$\rho=\frac{v_4}{v_3}$——柴油机预胀比；

$\varepsilon=\frac{v_1}{v_2}$——柴油机压缩比；

$\varepsilon_S=\varepsilon_k\cdot\varepsilon$——循环总压缩比。



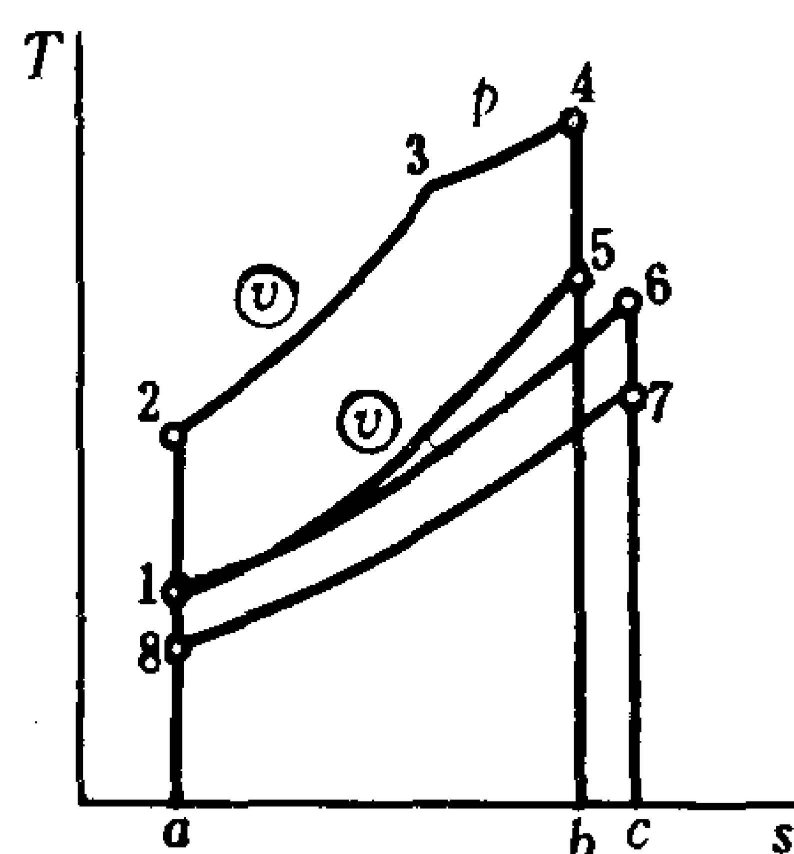


图 1.1.4-32 增压柴油机理论循环

上式结果表明，废气涡轮增压柴油机理想循环热效率 η_t，除取决于柴油机的 ε、ρ 和 λ 外，还与增压器压缩比 ε_k 及涡轮机膨胀比 δ_T 有关。η_t 随柴油机 ε、λ 的增大及 ρ 的减少而提高，同时，η_t 随涡轮机的膨胀比 δ_T 增大而提高，随压缩机的压缩比 ε_k 的增大而降低。

从式中也可得到，如不实施增压，即 $\varepsilon_k=\delta_T=1$时，循环热效率公式即变成混合加热循环热效率的公式。

柴油机采用排气涡轮增压，循环热效率的提高并不显著，其真正目的是增加每循环的空气量，以加大喷油量，提高柴油机的总功率，这是一种提高发动机功率的有效措施。

9 蒸汽动力装置循环

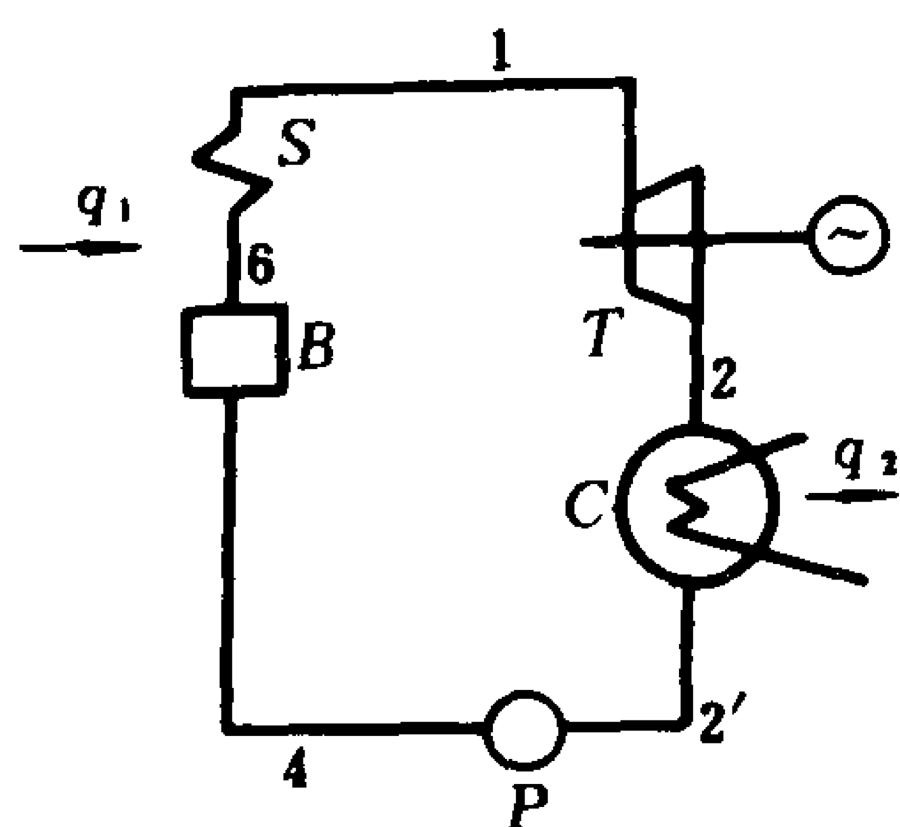


图 1.1.4-33 朗肯循环示意图

蒸汽动力装置循环中的动力机有汽轮机和蒸汽机，无论是哪一种，它们的基本工作原理及所应用的基本循环都是相同的。汽轮机动力装置是大型船舶中的一种动力装置。

9.1 简单蒸汽动力装置循环—朗肯循环

图 1.1.4-33 是朗肯循环的示意图，图中 B 为锅炉，S 为蒸汽过热器，T 为汽轮机，C 为冷凝器，P 为给水泵。图 1.1.4-34为朗肯循环的 p-v 图及 T-s 图，图中 1-2 为蒸汽在汽轮机绝热膨胀对外作功；2-3 为排汽在冷凝器中等压放热凝结；3-4 为凝结水在给水泵中被绝热压缩；4-5-6-1 为水在锅炉中和过热器定压吸热产生过热蒸汽。

循环的热效率 $$\eta_t=\frac{q_1-q_2}{q_1}=\frac{h_1-h_2}{h_1-h_3}=\frac{h_1-h_2}{h_1-h_2'} \tag{1.1.4-110}$$

耗汽率 $$d=\frac{3600}{h_1-h_2}\ \mathrm{kg/(kW\cdot h)} \tag{1.1.4-111}$$

式中：h_1、h_2——分别为蒸汽进入和排出汽轮机的焓；

h_2'——在 p_2 下饱和水的焓。

式(1.1.4-111)是忽略水泵功的结果。从式中可见，在相同初压 p_1 及背压 p_2 下，提高新汽初温 t_1 可使 η_t 提高；在相同初温 t_1 及背压 p_2 下，提高 p_1 也可使 η_t 提高；在相同 p_1 和 t_1 下，降低背压 p_2，也能使 η_t 提高。这是因为提高 t_1 或 p_1，却能提高循环的加热平均温度 t_{1m}；降低 p_2，能降低放热温度 t_2，使加入循环的热量得到充分地转换为功。

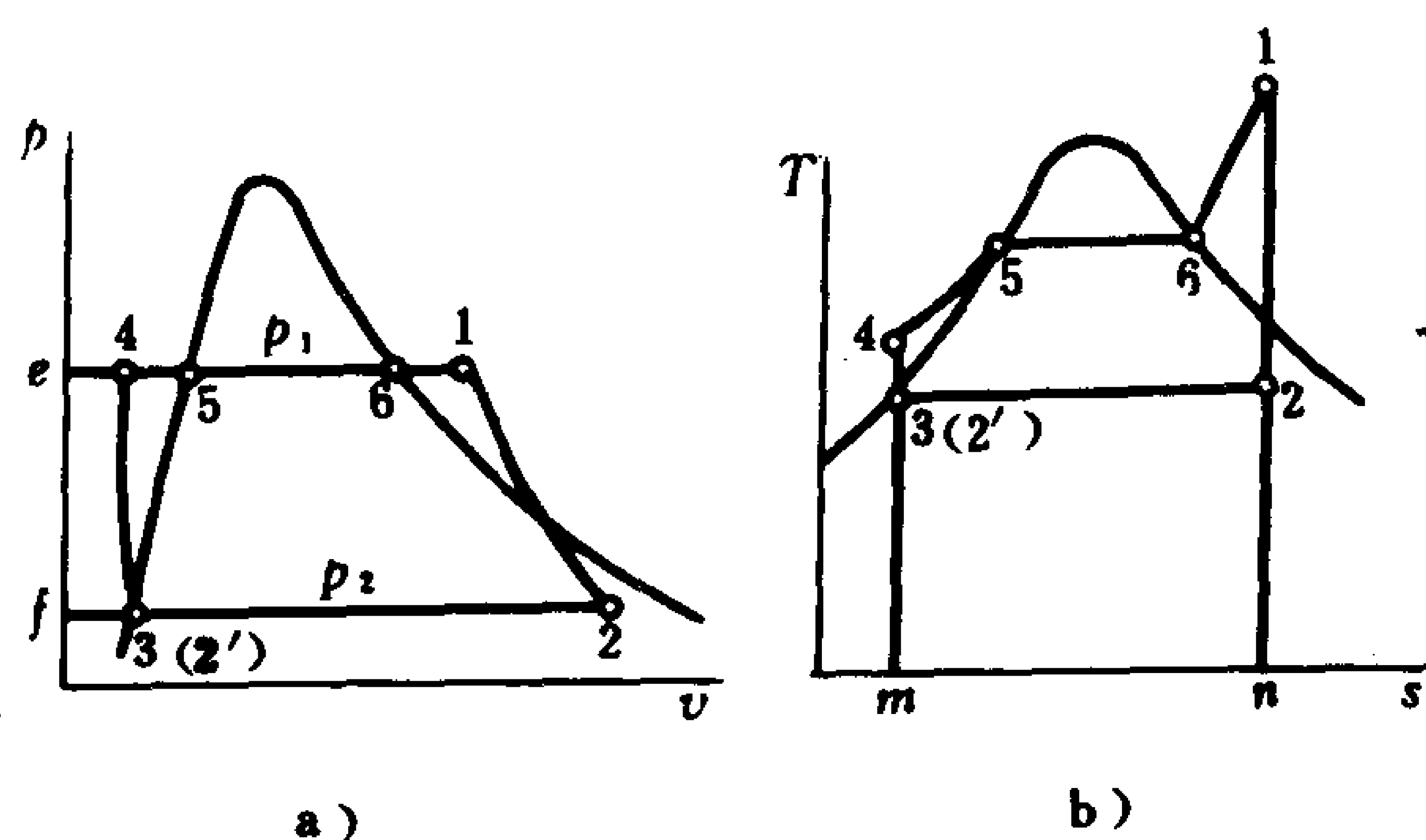


图 1.1.4-34 朗肯循环 p-v 和 T-s 图

例：某蒸汽动力装置船舶，耗油量为 1400 kg/h，油的标准发热值为 41800 kJ/kg (10000 kcal/kg)，汽轮机轴功率为 W =5500 kW，试求：

(1)该动力装置的实际热效率；

(2)已知该装置的锅炉蒸发量 $\dot{m}$=18000 kg/h，锅炉进水温度为 200℃，锅炉出口蒸汽压力 p_1=4.0 Mpa，温度 t_1=500℃，求锅炉热效率；

(3)按 t_1=500℃作为高温热源温度，环境温度 t_2=20℃为低温热源温度，求卡诺循环热效率；

(4)求锅炉出口蒸汽的比㶲值；

(5)蒸汽轮机出口蒸汽压力为 p_2=0.05 MPa，求蒸汽温度及干度 x 值。

解：(1)该蒸汽动力装置的实际热效率 η

$$\eta=\frac{\text{单位时间内装置对外输出的功}}{\text{单位时间燃油燃烧的发热值}}=\frac{W\cdot 3600}{Q_H}$$

$$=\frac{5500\ (\mathrm{kJ/s})\ \times 3600(\mathrm{s})}{1400\ (\mathrm{kg/h})\ \times 41800\ (\mathrm{kJ/kg})}=34\%$$

（2）按给定水蒸汽参数 $p_1=4.0\ \mathrm{MPa}$，$t_1=500℃$，查表 1.1.4-24 得 $h_1=3445.2\ \mathrm{kJ/kg}$；200℃水的比焓值为 $h_2=853.4\ \mathrm{kJ/kg}$，则

锅炉热效率 $\eta_B=\frac{m(h_1-h_2)}{Q_H}$

$$=\frac{18000\times(3445.2-853.4)}{1400\times 41800}=79.7\%$$

（3）卡诺循环热效率 η_k

$$\eta_k=1-\frac{t_2+273}{t_1+273}=1-\frac{293}{773}=62\%$$

（4）锅炉出口蒸汽的比㶲值

若按锅炉出口水蒸汽的比焓值 h_1 计算，其比㶲值（所能作出的最大有用功）为

$$e_x=(h_1-h_0)-T_0(s-s_0)$$
$$=(3445.2-83.9)-293(7.0909-0.2963)$$
$$=3361.3-1990.8=1370.1\mathrm{kJ/kg}。$$

（5）排汽的温度及干度 x 值

由给定汽轮机输出功 $W=5500\ \mathrm{kW}$，$\dot{m}=18000\ \mathrm{kg/h}$ 则

$$h_1-h_2=\frac{5500\times 3600}{18000}=1100\mathrm{kJ/kg}$$

$$\therefore h_2=3445.2-1100=2345.2\mathrm{kJ/kg}$$

按 $p_2=0.05\mathrm{MPa}$ 查表 1.1.4-24 得水蒸汽 $h'=340.57\mathrm{kJ/kg}$ $h''=2646\mathrm{kJ/kg}$ 及 $t_s=81.35℃$ 因此按式

$$h_2=h''\cdot x+h'(1-x)$$

得 $2345.2=2646\cdot x+340.57(1-x)$

即 $x=0.869$

及 $t_2=81.35℃$。

9.2 再热循环

提高 p_1 可以提高 η_t，但如不相应提高 t_1，将导致干度 x_2 的减小，产生一些不良后果。为克服排汽干度减小，则采用再热循环，如图 1.1.4-35，图 1.1.4-36 为其 T-s 图。

再热循环是将新汽膨胀到某一中间压力 p_b 后撤出汽轮机，导入锅炉内特设的再热器 R 或其它换热设备中，使之再加热，然后再导入汽轮机继续膨胀到背压 p_2。

再热循环的热效率为

$$\eta_t=\frac{w_0}{q_1}=\frac{(h_1-h_b)+(h_a-h_2)}{(h_1-h_2')+(h_a-h_b)} \quad (1.1.4\text{-}112)$$

耗汽率为 $$d=\frac{3600}{(h_1-h_b)+(h_a-h_2)}\ \mathrm{kg/(kW\cdot h)} \quad (1.1.4\text{-}113)$$

式中：h_1——进入汽轮机新汽的焓；

h_b——新汽绝热膨胀到 p_b 时的焓；

h_a——在再热器中蒸汽被再热后的焓；

h_2——蒸汽绝热膨胀到 p_2 下的焓；

h_2'——在 p_2 下饱和水的焓。

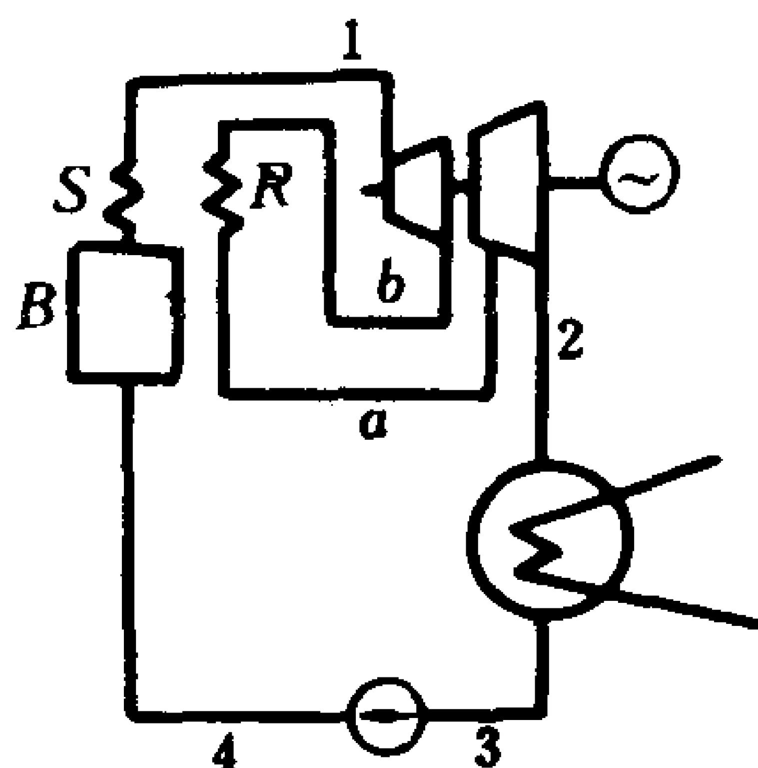


图 1.1.4-35 再热循环示意图

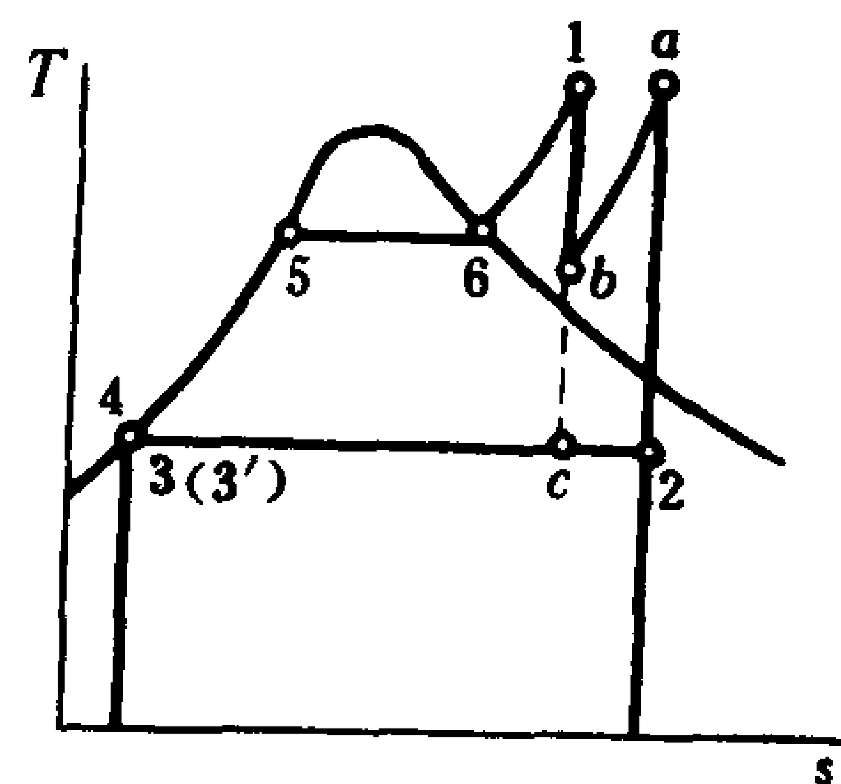


图 1.1.4-36 再热循环 T-s 图

从上式不能看出再热循环的热效率较之基本循环效率提高还是降低。但可分析，如果再热而附加的部分 b-a-2-c-b 效率比原来循环效率为高，则可使循环的总效率提高，反之则降低。根据已有的设计和运行经验，中间压力 p_b 在 20～30%p_1 范围内，对 η_t 提高的作用最大，约能提高 4～5%。但选取中间压力时，必须注意使终态干度 x_2 在容许范围内。

采用再热循环后，将使设备和系统复杂化，投资也加大。如蒸汽动力装置的功率为 30000 kW，$p_1=6.4$MPa，$t_1=510°\pm5$℃一般不采用再热循环；而当 p_1 提高到 9 MPa，t_1 仍为510°±5℃时，则采用再热循环，以防止 x_2 随 p_1 的提高而降低。

9.3 回热循环

回热循环的目的在于提高锅炉给水温度，从而提高循环热效率。

图 1.1.4-37 是一次抽汽的回热循环。图 1.1.4-38 是该循环的 T-s 图。每千克状态 1 的新蒸汽进入汽轮机中绝热膨胀至状态 o_1(p_{01}、t_{01}) 时，即从汽轮机中抽出 α_1 千克蒸汽引入回热器 R 中使之在定压下凝结放热，成为 α_1 千克的饱和水。余下$(1-\alpha_1)$千克的蒸汽继续绝热膨胀到状态 2，然后进入凝汽器，凝结成为 2′状态的水，经给水泵进入回热器，接受 α_1 千克蒸汽凝结时所放出的热量而提高温度到状态o_1'，并与 α_1 千克凝结水汇总为 1 千克状态 o_1'的饱和水，再由给水泵输入锅炉中吸热，在定压下产生成为状态 1 的新蒸汽，构成了抽汽式的回热循环。

略去水泵功，则循环热效率为

$$\eta_{tR}=\frac{(h_1-h_{01})+(1-\alpha_1)(h_{01}-h_2)}{h_1-h_{01}'} \qquad (1.1.4\text{-}114)$$

式中：α_1——抽汽量，α_1 由热平衡方程确定，$\alpha_1=\dfrac{h_{01}'-h_2'}{h_{01}-h_2'}$；

h_{01}——状态 o_1 蒸汽的焓；

h_{01}'——在回热器中饱和水的焓。

采取回热循环，可提高平均加热温度，使循环热效提高。通常采用二到四级抽汽，给水加热温度

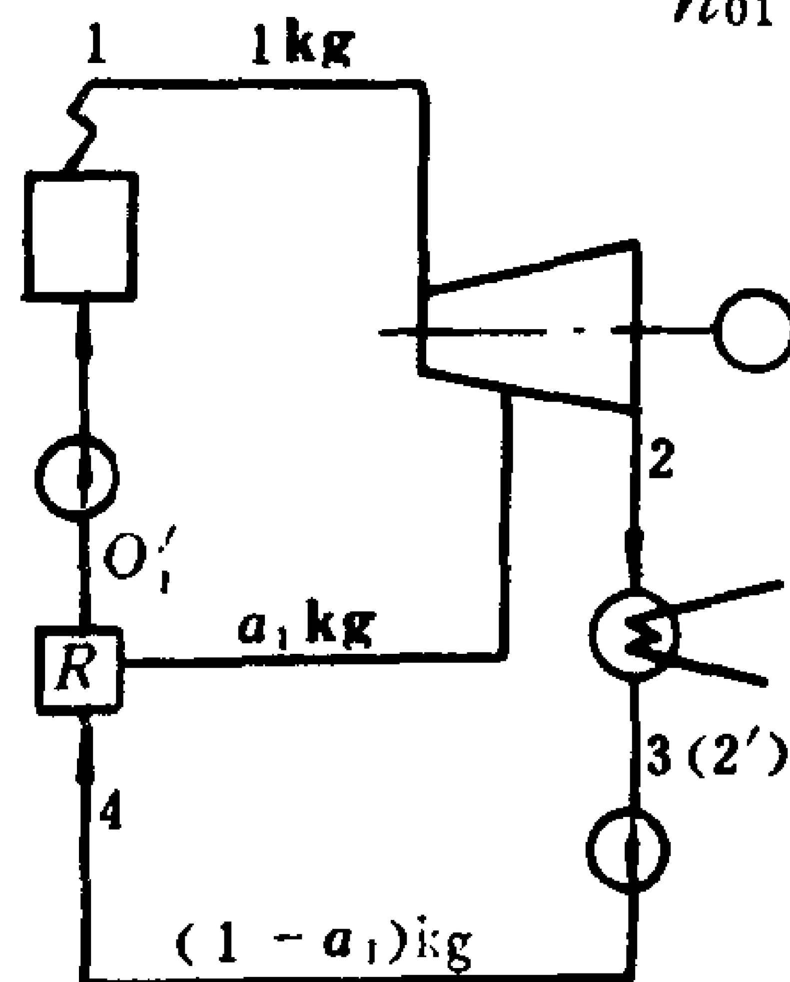


图 1.1.4-37 再热循环示意图

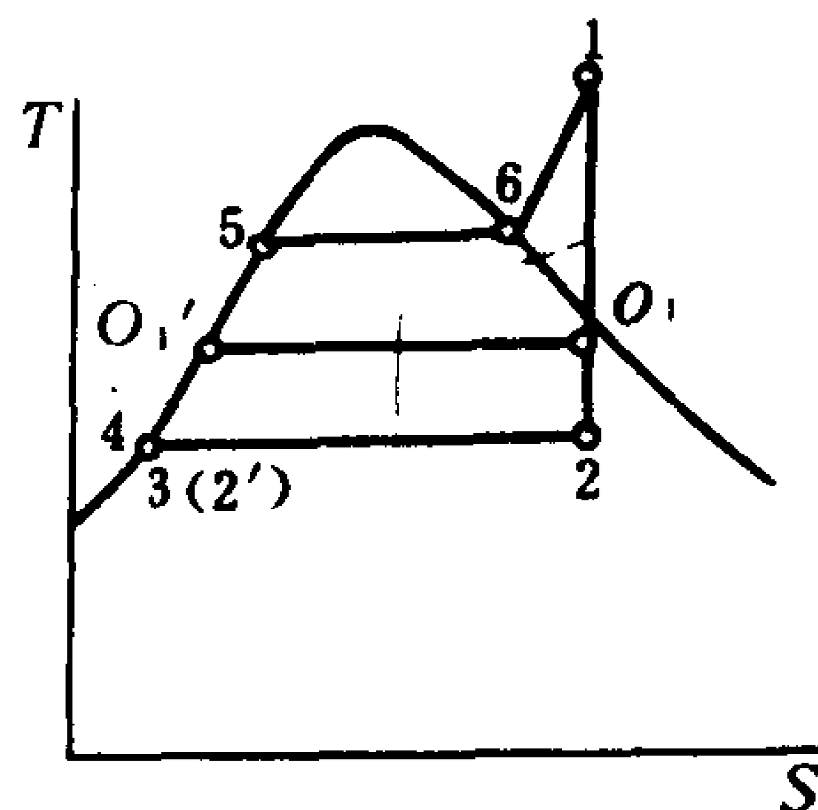


图 1.1.4-38 再热循环 T-s 图

一般不超过200℃。我国国产机组的回热级数和给水温度的规定如表1.1.4-30。

表1.1.4-30　　　　国产机组回热级数与给水温度

技术范围 \ 机组型号	N6-35	N12-35	N50-90	N100-90	N200-130	N300-160
功率（MW）	6	12	50	100	200	300
参数（p_1/t_1/再热温度 t）	35/435	35/435	90/535	90/535	130/535/535	160/550/550
回热级数	3	3	4-5	7	8	9
给水温度℃	150	150	215	215	240	254

注：p_1的单位为bar。

10　制冷循环

逆向卡诺循环是制冷装置最理想的循环，但实际制冷循环的制冷系数与制冷剂的性质有关，不能完全按逆向卡诺循环进行。按照制冷循环所用的方法不同，可分为压缩式、蒸汽喷射式及吸收式三类。压缩式由于采用制冷剂的不同，又分为空气压缩制冷与蒸汽压缩制冷两种，通常多用后者。

10.1　空气压缩制冷循环

这种循环是利用空气作工质(制冷剂)，根据空气在一定压力下进行绝热膨胀，导致温度下降这一性质完成制冷的，其p-v图和T-s图如图1.1.4-39所示。

其循环制冷系数为

$$\varepsilon=\frac{q_2}{w_{\text{in}}-w_{\text{out}}}=\frac{T_1}{T_2-T_1}=\frac{1}{\dfrac{T_2}{T_1}-1}=\frac{1}{\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1}\tag{1.1.4-115}$$

从上式结果可见，空气制冷循环的制冷系数随压力比$\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)$的减小而增大，即降低循环的压力和温度范围可使 ε 增大。

由于利用空气作工质，不能实现等温吸热和等温放热的原因，致使制冷系数较低，且空气的比热值小，使单位质量制冷量很小，所以这种制冷循环已逐渐被淘汰。

10.2　蒸汽压缩制冷循环

蒸汽压缩制冷循环是采用低沸点物质(即在大气压力下，其沸腾温度 $t_s\leq0$℃）作制冷剂，在制冷装置中，可产生制冷剂液、汽两相的交替变化，实现等温吸热和等温放热过程，理论上可以实现逆向卡诺循环，使制冷系数较高，同时因制冷剂比潜热大，使单位质量制冷量大。

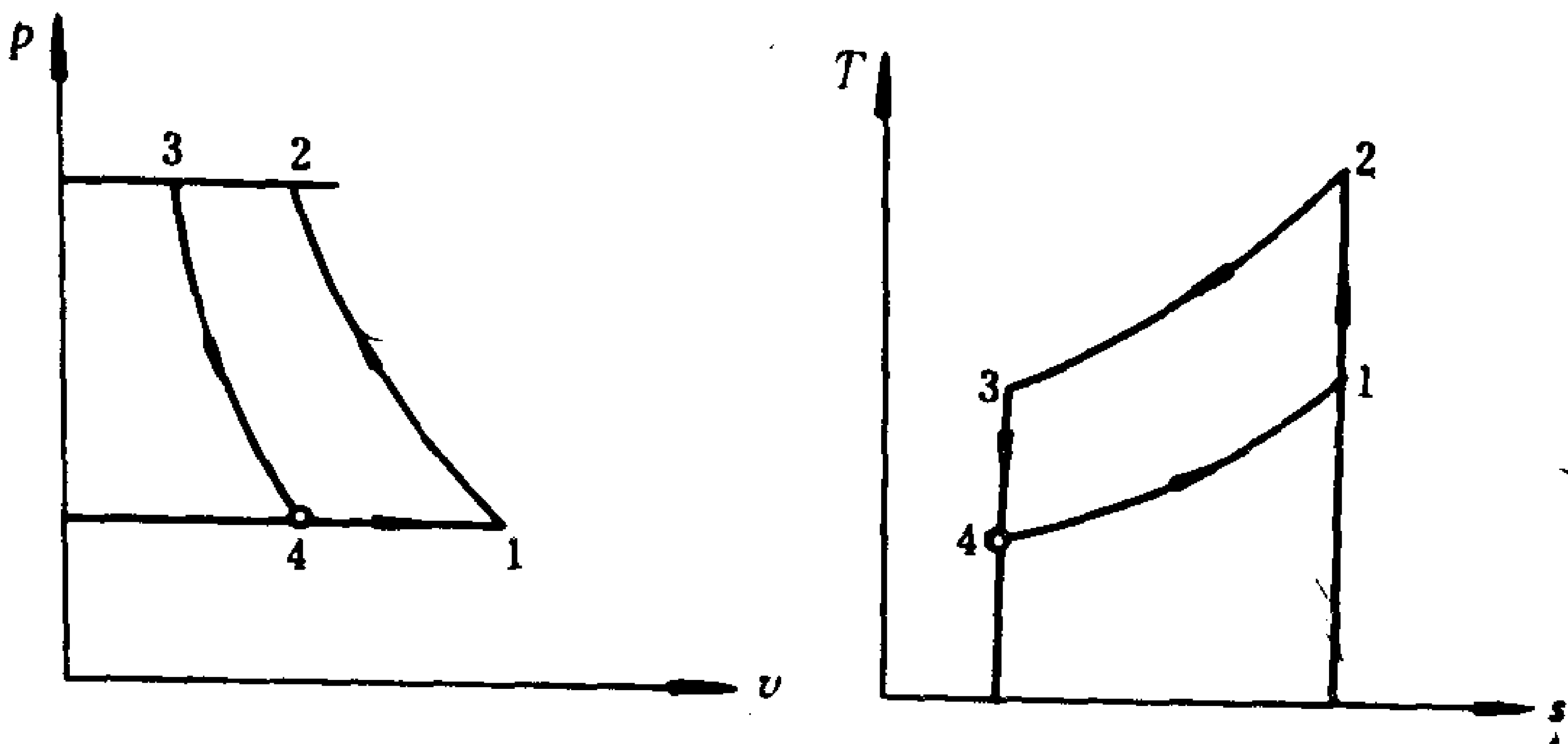


图1.1.4-39　空气压缩制冷循环 p-v 和 T-s 图

图1.1.4-40为实际应用

的蒸汽压缩制冷循环的 T-s 图。图中 1-2 为制冷剂在压缩机中的绝热压缩过程；2-3 为制冷剂在凝汽器中的定压放热过程；3-4 为制冷剂在节流阀中的绝热节流过程，$h_3=h_4$；4-1 为制冷剂在蒸发器中定压等温蒸发过程，即单位质量制冷量 $q_2=h_1-h_4$。

图 1.1.4-40　蒸汽压缩制冷循环

其循环制冷系数为

$$\varepsilon=\frac{q_2}{w}=\frac{h_1-h_4}{h_2-h_1}$$

式中：w——单位质量制冷剂的压缩耗功量，$w=h_2-h_1$；

h_1——制冷剂进入压缩机的比焓；

h_2——在压缩机中绝热压缩后制冷剂的比焓；

h_4——经节流阀绝热节流后制冷剂的比焓。

为了提高该循环的制冷系数 ε，可以利用"过冷"的方法来达到，即制冷剂在凝汽器中的饱和液体（状态 3）定压冷却为过冷液体（状态 3′），如图 1.1.4-41 所示的 3-3′，然后再从状态 4′经节流阀节流降压降温至状态 5′，则循环的制冷量增加了 $\Delta q''$。（面积 5.6.6′-5′-5），而压缩功未变，因此，制冷系数得到了提高。

图 1.1.4-41　蒸汽压缩制冷（过冷）循环

表 1.1.4-31 为饱和R-12（CCl_2F_2）蒸汽性质表。

表 1.1.4-31①　　饱和R-12 (CF_2Cl_2)蒸汽性质表

温度	压力	比容		焓		汽化潜热	熵	
		液体	蒸汽	液体	蒸汽		液体	蒸汽
t ℃	p 10^5Pa	v' $\frac{m^3}{kg}$	v'' $\frac{m^3}{kg}$	h' $\frac{kJ}{kg}$	h'' $\frac{kJ}{kg}$	r $\frac{kJ}{kg}$	s' $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	s'' $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$
−70	0.12336	0.6234	1.1259	359.394	539.594	179.613	3.93768	4.82398
−60	0.22702	0.6349	0.6394	367.098	544.284	177.185	3.97519	4.80669
−50	0.39216	0.6468	0.3854	375.095	549.224	174.129	4.01195	4.79254
−40	0.64243	0.6592	0.2441	383.301	554.164	170.863	4.04800	4.78103
−30	1.00469	0.6725	0.1613	391.758	559.105	167.346	4.08346	4.77190
−25	1.23720	0.6793	0.1331	396.113	561.575	165.462	4.10097	4.76788
−20	1.50688	0.6868	0.1107	400.467	564.003	163.536	4.11834	4.76449
−15	1.82619	0.6940	0.0968	404.947	566.432	161.484	4.13563	4.76135

续上表

温度	压力	比容		焓		汽化潜热	熵	
		液体	蒸汽	液体	蒸汽		液体	蒸汽
t ℃	p 10^5Pa	v' $\frac{m^3}{kg}$	v'' $\frac{m^3}{kg}$	h' $\frac{kJ}{kg}$	h'' $\frac{kJ}{kg}$	r $\frac{kJ}{kg}$	s' $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$	s'' $\frac{kJ}{(kg\cdot K)}$
−10	2.19100	0.7018	0.0781	409.469	568.860	159.391	4.15280	4.75859
−5	2.60876	0.7092	0.0663	414.032	571.205	157.172	4.16984	4.75612
0	3.08566	0.7173	0.0567	418.680	573.549	154.869	4.18680	4.75394
5	3.62443	0.7257	0.0486	423.369	575.852	152.483	4.20363	4.75189
10	4.23009	0.7342	0.0420	428.142	578.113	149.971	4.22040	4.75013
20	5.66706	0.7524	0.0317	437.897	582.467	144.570	4.25370	4.74691
30	7.43442	0.7734	0.0243	447.861	586.486	138.624	4.28673	4.74406
40	9.58178	0.7968	0.0188	458.077	590.087	132.009	4.31939	4.74096

① 引自《制冷工程设计手册》，中国建筑工业出版社，1978 年。

表 1.1.4-32 列出了几种制冷剂的物理性质。

表 1.1.4-32 **几种制冷剂的物理性质**

名称	化学式	分子量	沸点℃ (1 atm)	临界温度 ℃	临界压力 MPa	冰点 0℃ 0.101325 MPa
水	H_2O	18.016	100.00	374.15	22.565	0.0
氨	NH_4	17.031	−33.4	132.15	11.15	−77.7
氟里昂 11	$CFCl_3$	137.382	−23.7	198.0	4.196	−111
氟里昂 12	CF_2Cl_2	120.925	−29.8	112.04	3.96	−155
氟里昂 113	$C_2F_3Cl_3$	187.39	47.6	214.10	3.415	−36.5
二氧化碳	CO_2	44.011	−78.48	31.04	7.3	−56.6
二氧化硫	SO_2	64.06	−10.00	157.3	7.78	−75.3
氯甲烷	CH_3Cl	50.49	−23.74	143.1	6.59	−97.6

表 1.1.4-33 为氨饱和蒸汽的性质。

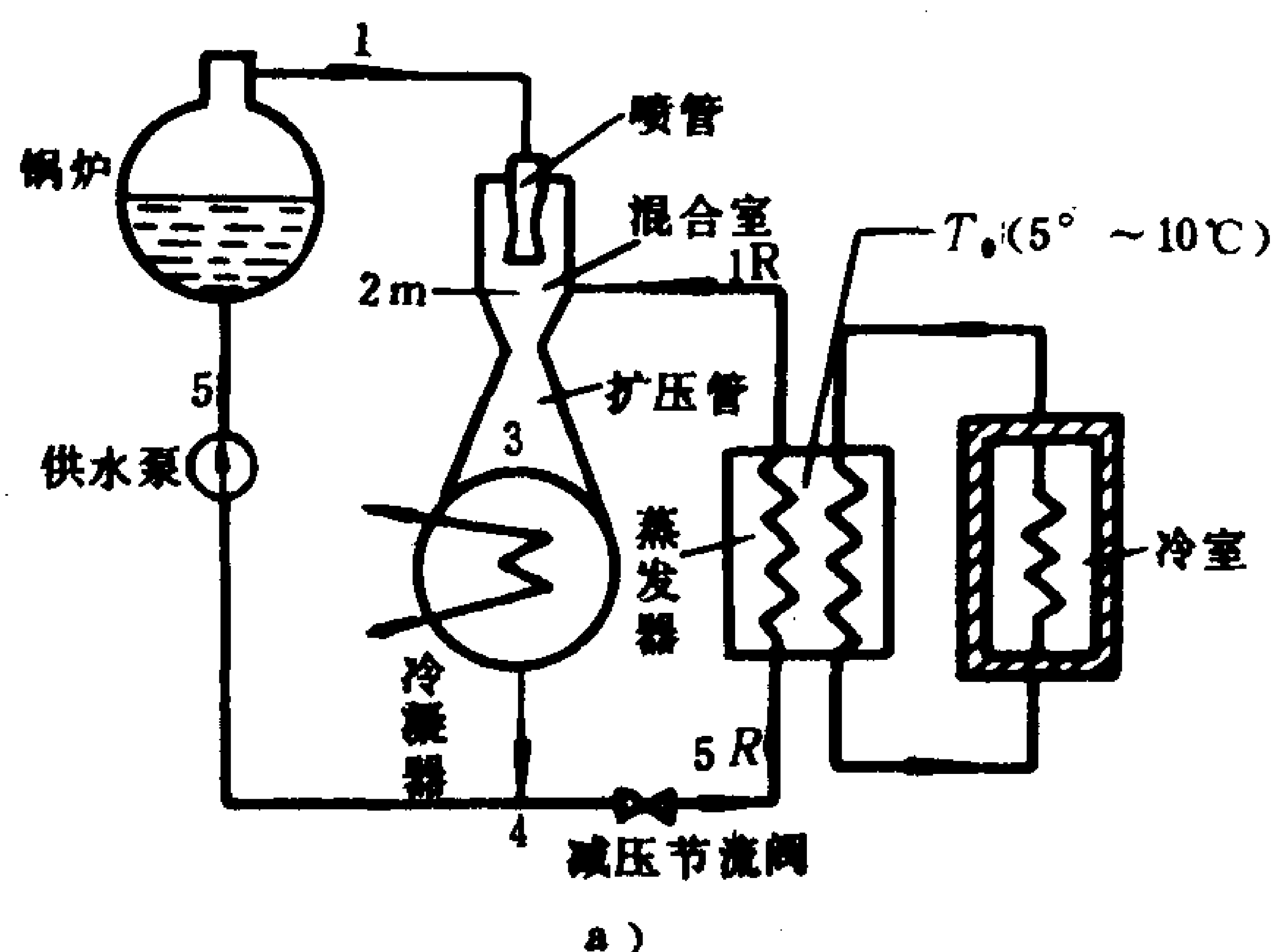
表 1.1.4-33 **氨饱和蒸的性质表**

t(℃)	p(10^5Pa)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kg)	s'' (kJ/kg)	
−30	1.1954	282.27	1640.85	3.6601	9.2486	
−20	1.9025	327.28	1655.71	3.8171	9.0895	
−10	2.9086	372.75	1669.15	4.0164	8.9438	
−6	3.4173	391.05	1674.09	4.0851	8.6690	
0	4.2943	418.68	1681.08	4.1868	8.8094	
10	6.1498	465.20	1691.26	4.3530	8.6838	
20	8.5720	512.38	1699.55	4.5155	8.5658	
30	11.6650	560.36	1705.83	4.6746	8.4536	
40	15.5435	609.26	1709.76	4.8370	8.3455	

10.3 汽流引射压汽式制冷装置

图 1.1.4-42 为汽流引射压气式制冷装置示意图及其 T-s 图。

蒸汽喷射制冷本质上也是蒸汽压缩制冷，不同的是它不耗功而耗费热来产生压缩作用。从图中看到，这种制冷装置使用两种工质，一是制冷工质；另一是工作工质，用以压缩（在喷射器中）制冷工质。其工作原理是工作蒸汽引入喷管作绝热膨胀，压力降低，将制冷工质



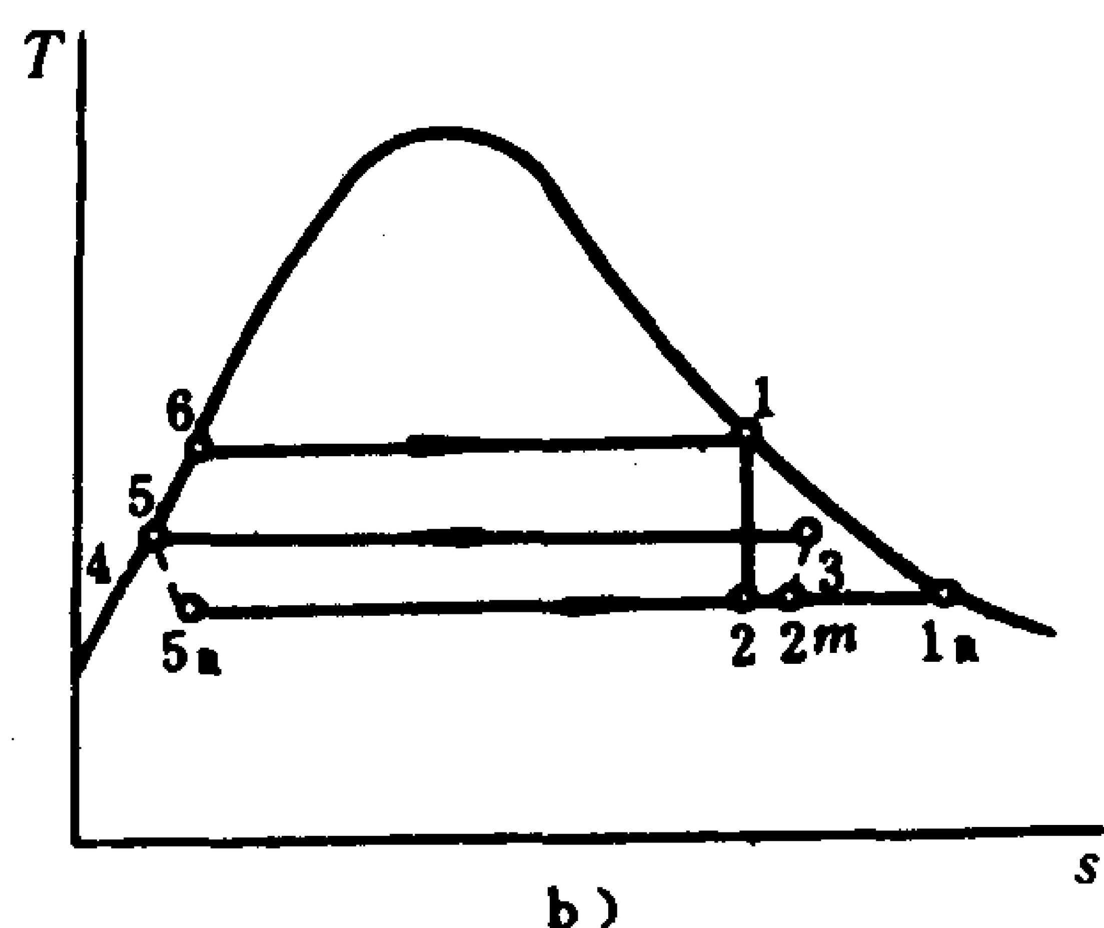


图 1.1.4-42 喷射式制冷

吸入混合室。两路蒸汽混合后进入扩压管，使压力增加到使对应的饱和温度比凝汽器中冷却水的温度略高一些。此后，蒸汽由扩压管进入凝汽器，向冷却水放热而凝结成液态。凝汽器出来的凝结水一部分由水泵打入锅炉，其余的进入节流阀，部分蒸发，温度下降，作为制冷剂导入蒸发器，在其中自冷媒（一般用盐溶液）吸热重新汽化而完成循环。

这种制冷装置总的效果是工作蒸汽从热源吸入热量 q_1，达到将 q_2 的热量从冷室转移到环境介质中的目的。其经济性可用能量利用系数 ξ 来度量，即

$$\xi=\frac{q_2}{q_1} \qquad (1.1.4.116)$$

式中：q_2——制冷装置的制冷能力。

这种制冷装置常用于空调和车间降温。

10.4 吸收式制冷装置

吸收式制冷装置也是耗费热能来达到制冷效果的装置。

图 1.1.4-43 表示氨吸收式制冷装置作用原理图。制冷剂氨从冷凝器出来为液体氨，经节流阀进入蒸发器。在蒸发器中因吸收了冷室循环盐液（冷媒）所放出的热量，汽化而成干饱和氨蒸汽后再进入吸收器。在吸收器中被水吸收成温度较高的水-氨溶液。溶解放出的热量被冷却水带走。浓缩的水-氨溶液被泵输送到氨气发生器中，在那里由外界加热，从溶液中蒸发出压力较高的氨气，溶液变成稀溶液。氨气进凝汽器排热给冷却水而凝结成液态，完成循环。稀溶液则通过减压节流回到吸收器，重新吸收氨气而成浓溶液。这一装置的经济性同样用能量利用系数来表示，即

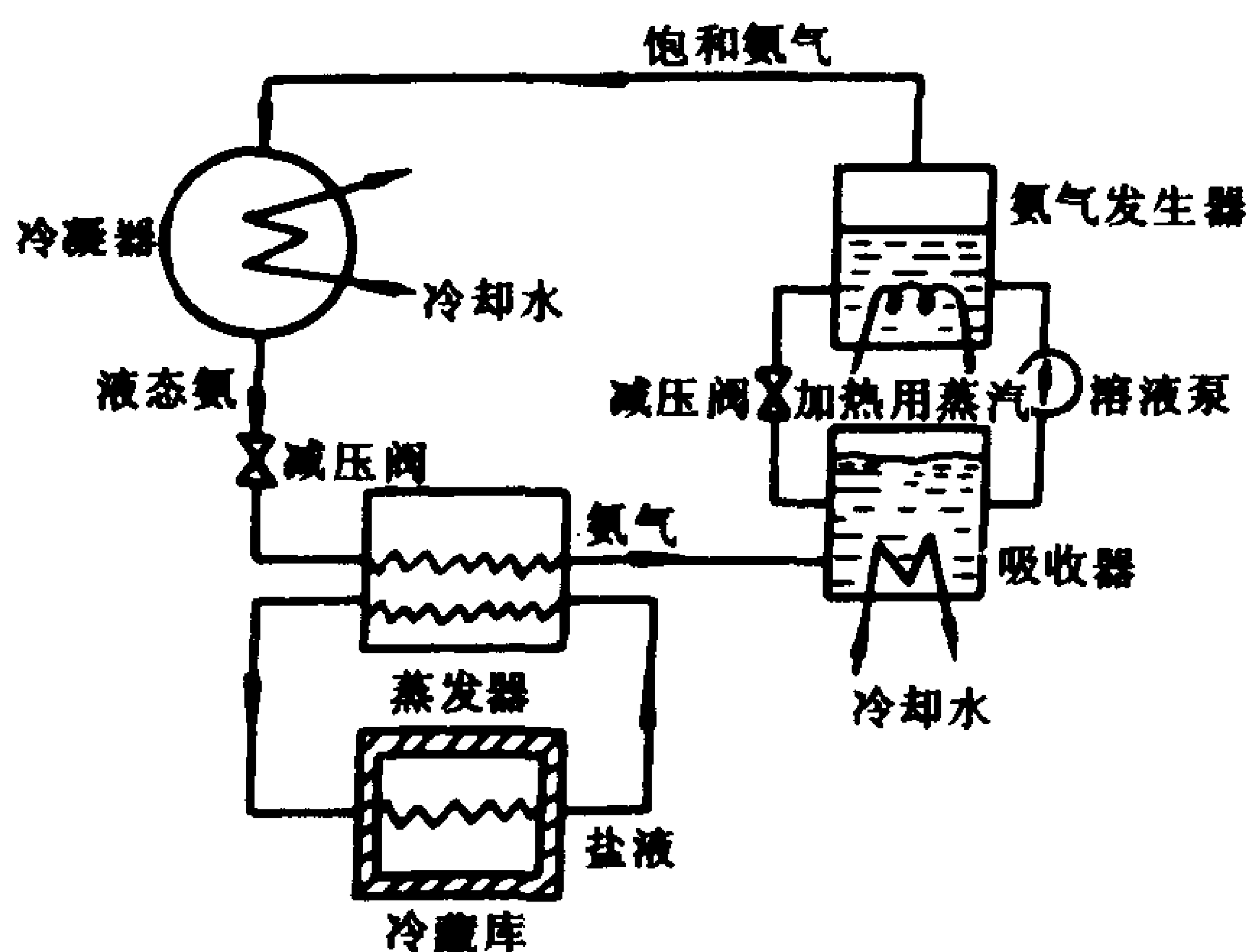


图 1.1.4-43 吸收式制冷

$$\xi=\frac{q_2}{q_1} \qquad (1.1.4\text{-}117)$$

式中：q_1——消耗的高温热量，即供给氨发生器的热量；

q_2——装置的制冷能力，即氨自蒸发中吸收的热量。

吸收式制冷装置的实际能量利用系数较小，但由于其结构简单，造价较低，故广泛用于空调和小冰箱。

参考文献

〔1〕沈维道等合编：工程热力学，高等教育出版社，1983

〔2〕庞麓鸣等编：工程热力学，人民教育出版社，1980

〔3〕曾丹苓等合编：工程热力学，人民教育出版社

〔4〕机械工程手册：第6篇，热工学，机械工业出版社，1978

〔5〕潘延龄、舒宏纪主编：工程热力学和传热学，人民交通出版社，1982

〔6〕*ривкинс.л.; Термодинамические Своиства, М.* 《*Энергия*》，1973

〔7〕William C. Reynolds, Henry C. Perkins: 《Engineering Thermodynamics》, McGrawHill Book Company, 1977

第5章 传 热 学

由温度差而引起的热量传递过程是传热学研究的对象。工程上所要确定的是每单位时间内通过每单位面积所传递的热量，或者是传递热量物体各处的温度值。

1 基本概念

1.1 温度场

某一时刻τ，空间各点温度的分布称作温度场。若物体内温度沿x、y、z三个轴都有变化，且随时间而改变，这就是“三维不稳定温度场”，其数学表达式为$t=f(x、y、z、\tau)$。

若温度场不随时间而改变，这就是“稳定温度场”。温度只沿x坐标轴变化的稳定温度场，其数学表达式为$t=f(x)$。

1.2 温度梯度

物体内最显著的温度变化是在等温面的法线方向上。温度差Δt对于沿法线方向两等温面之间距离Δn的比值极限，称为“温度梯度”，其数学表达式为

$$\lim\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_{\Delta n\to 0}=\frac{\partial t}{\partial n}$$

温度梯度愈大，热传递也愈强烈。热传递的方向与温度梯度相反。

1.3 导热基本定律——傅立叶定律

导热是依靠物质的分子，原子或自由电子等微粒的热运动来传递热能的。傅立叶在研究了固体的导热现象后，确定了由导热所传递的热流密度q与物体内温度梯度$\partial t/\partial n$的绝对值成正比，与温度梯度的方向相反。其数学表达式为

$$q=-\lambda\ (\partial t/\partial n)\quad \mathrm{W/m^2} \qquad (1.1.5\text{-}1)$$

式中，比例系数λ为导热系数。此式即为傅立叶导热定律的数学表达式。

对于图 1.1.5-1 所示的单层平壁导热，是稳定的一维导热问题。当导热系数为常数时，该平壁的温度梯度为$(t_2-t_1)/\delta$，代入上式可得单层平壁的导热计算公式为

$$q=\lambda(t_1-t_2)/\delta \qquad (1.1.5\text{-}2)$$

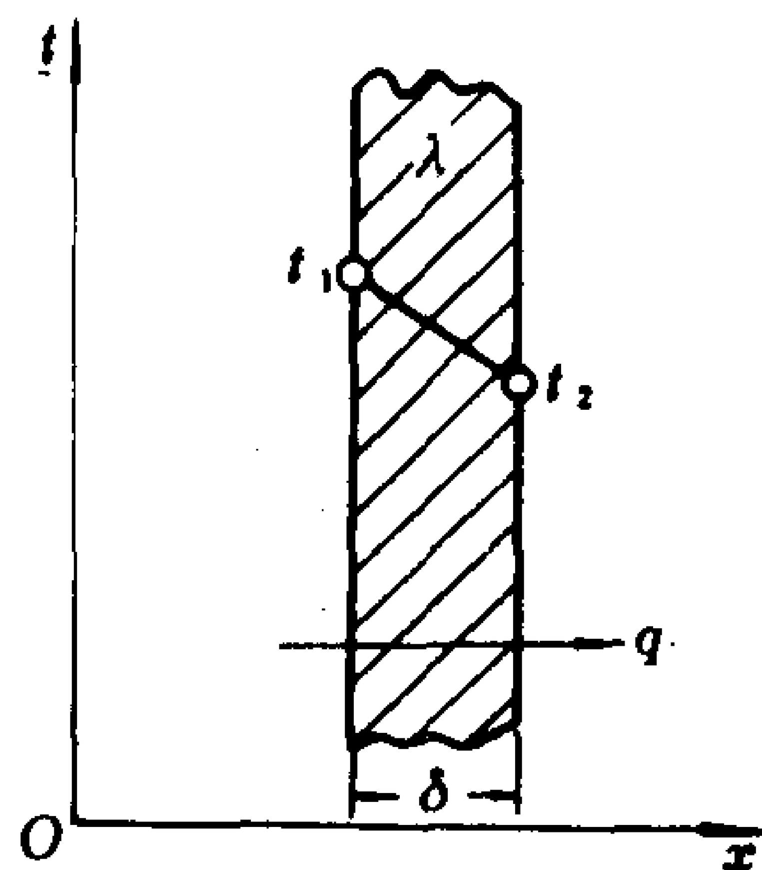


图 1.1.5-1 单层平壁导热

1.4 导热系数

导热系数λ表明物体导热能力的大小。由式(1.1.5-1)可看出，导热系数是每单位温度梯度所传递的热流密度值。它的单位是W/(m·℃)。对于不同的物质具有不同的λ值。即使对于同一种物质来说，λ值还与该物质的结构、密度、潮湿程度、压力以及温度有关。大多数物质的λ值受温度的影响较大。对于多孔物质，它是由固体与气体混合组成的，如泡沫塑料的λ值与其密度ρ的关系较大，ρ愈小，其λ值便愈小。表 1.1.

5-1与表 1.1.5-2 列出轮机工程中用到的各种固态物质导热系数值。气体和液体的导热系数值可查表 1.1.5-11 到 1.1.5-18 各物理性质表。

1.5 导温系数

应用傅立叶定律，对于无内热源的固体可导出一维导热方程为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}=\frac{c_p\rho}{\lambda}\frac{\partial\tau}{\partial\tau}=\frac{1}{a}\frac{\partial t}{\partial\tau} \quad (1.1.5\text{-}3)$$

式中，a为导温系数，由上式可知

$$a=\lambda/c_p\cdot\rho \quad \mathrm{m^2/s} \quad (1.1.5\text{-}4)$$

导温系数a表示物体在加热或冷却过程热扩散的快慢。a值较大的紫铜，其λ值较大，cp与ρ的乘积又较小，a值为 $11.2\times10^{-5}\mathrm{m^2/s}$。而钢的$a$值为 $1.47\times10^{-5}\mathrm{m^2/s}$，二者相差 7 倍多。实践表明用手握同样尺寸的紫铜棒和钢棒拨火，前者较快地感到烫手。可见导温系数a值是影响热传导的一项重要物性参数，其数值与导热系数常列于同一表中。

1.6 蓄热系数

当周期加热或冷却物体时，物体表面温度波动的振幅为 1℃时，导入物体的最大热流密度值称为蓄热系数S，其计算式为

$$S=\sqrt{\frac{2\pi\rho c\lambda}{Z}} \quad \mathrm{W/(m^2\cdot k)} \quad (1.1.5\text{-}5)$$

式中：λ——导热系数，W/（m·K）；

c——比热，J/（kg·k）；

ρ——密度，$\mathrm{kg/m^3}$；

Z——热流波动周期，s。

当$Z=24$ h，蓄热系数S的角标为 24，写作S_{24}，其计算式为

$$S_{24}=0.00853\sqrt{\rho c\lambda} \quad \mathrm{W/(m^2\cdot k)} \quad (1.1.5\text{-}6)$$

例如有两种不同材料的地面，一种是松木（垂直木纹）其$S_{24}=4.18$ W/（$\mathrm{m^2}$），另一种是菱苦土，其$S_{24}=9.32$ W/（$\mathrm{m^2}$）。当二者的表面温度相同，并低于人的体温时，赤脚在这两种材料铺设的地面上行走，将明显地感到菱苦土地面远比松木地面凉冷。这是因为菱苦土的蓄热系数较松木为大，它从脚底吸走的热量要多。由此可见，为了改进居住条件，在住舱地面上铺设S_{24}更小的地毯是有效的。各种建筑材料的S_{24}值列表于 1.1.5-2 中。

表 1.1.5-1 **金属的热物性参数［1］**

材料名称	熔点	300 k时的参数				不同温度下的λ值		
	℃	ρ kg/m³	C_p J/(kg)	λ W/(m)	a×10⁶ m²/s	200 K	400 K	600 K
纯铝	660	2702	903	237	97.1	237	240	231
硬铝Cu 4.5% Mg 1.5% Mn 0.6%	502	2770	875	177	73.0	163	186	186
铸铝 195(Cu 4.5%)	—	2790	883	168	68.2		174	185
纯铜	1085	8933	385	401	117	413	393	379
工业用青铜 (Cu 90% Al 10%)	1020	8800	420	52	14	42	52	59

续上表

材料名称	熔点	300 k时的参数				不同温度下的λ值		
	℃	ρ kg/m³	C_p J/(kg·K)	λ W/(m··k)	a×10⁶ m²/s	200 K	400 K	600 K
锌黄铜	915	8530	380	110	33.9	95	137	149
康铜(Cu 55% Ni 45%)	1220	8920	384	23	6.71	19		
纯铁	1537	7870	447	80.2	23.1	94	69.5	54.7
一般碳钢		7854	434	60.5	17.7		56.7	48.0
硅碳钢		7817	446	51.9	14.9		49.8	44.0
不锈钢	1397	8055	430	15.1	3.91		17.3	20.0
铅	328	11340	129	35.3	24.1	36.7	34.0	31.4
镍铬合金	1399	8400	420	12	3.4		14	16
铂	1772	21450	133	71.6	25.1	72.6	71.8	73.2
铂铑合金	1527	16630	162	47	17.4		52	59
锡	232	7310	227	66.6	40.1	53.3	62.2	
锌	420	7140	389	116	41.8	118	111	103

表 1.1.5-2　船用建筑材料以及其他物质的热物性参数〔2〕〔3〕

材料名称	密度	导热系数	比热	蓄热系数
	ρ kg/m³	λ W/(m·K)	c kJ/(kg·k)	S_{24} W/(m²·K)
泡沫混凝土	232	0.077	0.88	1.07
泡沫混凝土	627	0.29	1.59	4.59
耐火粘土砖	2000	1.07	0.96	12.2
水泥砂浆	1800	0.93	0.84	10.1
石灰砂浆	1600	0.81	0.84	8.90
菱苦土	1374	0.63	1.38	9.32
厚纸板	1000	0.232	1.46	9.68
油毡纸	600	0.174	1.46	3.33
建筑用毛毡	150	0.058	1.88	1.093
矿物油毛毡	150	0.063	0.75	0.72
铺地用漆布	1100	0.186	1.88	5.29
石棉毡	420	0.116	0.83	0.17
平板玻璃砖	2546	0.71	0.83	11.08
玻璃棉	200	0.058	0.83	0.83
石棉水泥隔热板	500	0.12	0.83	1.96
石棉水泥隔热板	250	0.069	0.83	0.96
水泥珍珠岩制品	200	0.058	0.92	0.88
有机玻璃	1188	0.20		
棉絮	80	0.043		
松散锯末	304	0.148	0.75	1.57
松散矿渣棉	198	0.075	0.75	0.90
灰渣	3760	0.28	0.92	8.39
聚苯乙烯塑料	30	0.027	2.0	0.34
聚苯乙烯硬脂塑料	50	0.031	2.1	0.49
聚四氟乙烯	2190	0.29	1.47	8.24
橡木垂直木纹	800	0.23	2.51	5.815
橡木顺木纹	800	0.40	2.51	7.67
松木垂直木纹	550	0.17	2.51	4.18

续上表

材料名称	密度	导热系数	比热	蓄热系数
	ρ kg/m³	λ W/(m·K)	C kJ/(kg·K)	S_{24} W/(m²·K)
松木顺木纹	550	0.34	2.51	5.87
树脂木屑板	300	0.1163	2.51	2.2
胶合板	600	0.174	2.51	4.36
软木板	250	0.0693	2.09	1.628
沥青软木板	193	0.030		
聚氯乙烯硬泡沫塑料	45	0.043		
聚氯乙烯软泡沫塑料	27	0.052		
软聚氨酯泡沫塑料	30~40	0.023~0.034		
硬聚氨酯泡沫塑料	45	0.025		
水垢		1.31~3.14		
烟灰		0.058~0.116		
冰 (0℃)	917	2.2		
冰 (−20℃)	920	2.4	2.26	18.5
冰 (−40℃)	922.	2.67		
蒸发器上的霜层	50	0.023		
	100	0.0286		
	150	0.063		
	200	0.113		
	250	0.175		

1.7 对流换热公式

流体流过壁面在界面上发生的热量传递过程称为对流换热。对流换热时，通过界面的热流密度q与流体和壁面之间的温差成正比。其数学表达式为

$$q=\alpha\ (t_f-t_w)\quad \text{W/m}^2 \tag{1.1.5-7}$$

式中，比例系数α为对流换热系数。此式称为牛顿冷却定律。

1.8 对流换热系数

对流换热系数α表明流体与壁面对流换热的强弱程度。由式（1.1.5-7）可看出α是壁面上热流密度q与温差（t_f-t_w）的比值。它的单位是W/（m²·K）。α的数值与流体流过壁面的方式，流速以及流体的物性等因素有关。可见α不是物性参数，而是表征对流换热强弱程度的量。表 1.1.5-3 列出了几种常见的对流换热现象α值。

表 1.1.5-3　对流换热系数值的大致范围〔3〕

换热方式	α W/（m²·K）
空气自然对流	3 ~10
空气强制对流	20~100
水自然对流	200~500
水强制对流	3000~8000
中常压蒸汽强制对流	50~150
油强制对流	50~450
常压水沸腾	4000~10000
压力水沸腾	10000 以上
水蒸汽膜状凝结	4000~10000
有机物体膜状凝结	500~2000

1.9 折算辐射换热系数

高温烟气与锅炉换热壁面之间的换热量，除了对流换热外，还有辐射换热，这是因为烟气具有热辐射的能力。烟气对壁面的辐射换热计算在辐射换热一节中介绍，其辐射换热的热流密度q_r可写成式（1.1.5-7）的形式，即

$$q_r=\alpha_r\ (t_g-t_w) \qquad (1.1.5\text{-}8)$$

式中，α_r为折算辐射换热系数，t_g、t_w为烟气与壁面的温度。烟气与壁面的换热量由对流换热和辐射换热两部分合成，用公式表示为

$$Q=\ (\alpha+\alpha_r)\ (t_g-t_w)\ F \quad \text{W} \qquad (1.1.5\text{-}9)$$

式中，F为换热壁面积，$(\alpha+\alpha_r)$为总换热系数，α为对流换热系数。

1.10 平壁传热公式和传热系数

如图1.1.5-2所示为热流体烟气通过厚为δ、导热系数为λ的平壁向冷流体传递热量的过程，其传热量Q为

$$Q=k\ (t_{f1}-t_{f2})\ F \quad \text{W} \qquad (1.1.5\text{-}10)$$

式中，k为该传热过程的传热系数。k愈大表明传热能力愈强。传热系数k与热流体侧的换热系数α_1、冷流体侧的换热系数α_2、以及λ、δ等因素有关。可用下式表示

$$1/k=1/\alpha_1+\delta/\lambda+1/\alpha_2 \qquad (1.1.5\text{-}11)$$

式中，α_1、α_2为两侧的总换热系数。对于由烟气向水的传热过程来说，α_1是对流换热系数和辐射换热系数的和。而α_2只是壁面对水的对流换热系数。此式表示平壁传热过程的总热阻$1/k$等于平壁导热热阻δ/λ和壁二侧换热热阻的总和。

图1.1.5-2 单层平壁的传热

在各种不同的换热器中，k值的大致范围列于表1.1.5-4

表1.1.5-4 **不同传热条件下k值的大致范围〔4〕**

不同的传热条件	k W（$m^2\cdot K$）
暖气片：流动的热水对室内自然对流的空气	7～12
空气加热器：流动的水蒸汽对大气压下流动的空气	14～35
流动的烟气对大气压下流动的空气	10～18
空气冷却器：用水冷却流动的空气	50～120
锅炉：流动的烟气对水	50～150
蒸汽加热器：水蒸汽加热水	1000～4500

2 导热计算

2.1 稳定导热计算

对单一材料的平壁按式（1.1.5-2）可得稳定导热量的计算公式

$$Q=\ (t_1-t_2)/\ (\delta/\lambda F) \quad \text{W} \qquad (1.1.5\text{-}12)$$

将上式改写为

$$Q=(t_1-t_2)/R \quad \text{W} \tag{1.1.5-13}$$

将上式与欧姆定律比较，可见热流量与电流、温差与电位差相类比。显然与电阻相类比的$R=\delta/(\lambda\cdot F)$被称作导热热阻，其倒数$1/R$称为热导。多层平壁的导热总热阻与串联电路中各分电阻之和即总电阻相类比。可见只要知道导热物体两侧的壁温及其导热热阻，便可方便地求得导热量Q。表 1.1.5-5 列出几种常见情况下的导热热阻计算公式。

表 1.1.5-5 中所列的导热热阻计算公式是按导热系数为定值时导得的。实际上，导热时材料中各处温度不同，λ值也随温度而变化。因此在温度变化范围较大时，至少应取材料的平均温度值所对应的λ值来进行计算。

若所求解的问题，其边界面上的温度为未知值，仅给出边界与环境流体间的换热系数α和流体温度t_f，则按热阻叠加原理可在导热热阻上加以相应的换热热阻$1/(\alpha\cdot F)$，用这一总热阻便可求解传热量Q值。

表 1.1.5-5　**几种常见情况的导热热阻R值〔1〕〔5〕**

物体形状	图示	导热热阻 R ℃/W
1. 单层平壁	t_1 t_2 λ b δ 壁高l	$\delta/(\lambda F)=\delta/(\lambda lb)$ 适用于$\delta\leq0.1b$，$\delta\leq0.1l$
2. 多层平壁	t_1 t_2 t_3 t_4 λ_1 λ_2 λ_3 δ_1 δ_2 δ_3 b 壁高l	$\delta_1/(\lambda_1 lb)+\delta_2/(\lambda_2 lb)+\delta_3(\lambda_3 lb)$
3. 单层圆筒壁	t_1 t_2 $\frac{d_2}{2}$ $\frac{d_1}{2}$ λ 壁高l	$\frac{1}{2\pi\lambda l}\ln\frac{d_2}{d_1}$ $l\gg(d_2-d_1)$ 如$\delta/d_2\leq0.25$，则可用$\delta/\lambda Fm=2\delta/[\lambda l\pi(d_2+d_1)]$来计算，误差在4%以内

物 体 形 状	图 示	导 热 热 阻 R ℃/W
4. 多层圆筒壁		$\frac{1}{2\pi l}\sum\frac{1}{\lambda_i}\ \ln\ \frac{d_{i+1}}{d_i}$ $l\gg(d_i-d_1)$ 对于三层圆筒壁，其热阻为 $\frac{1}{2\pi l}\left(\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}+\frac{1}{\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}\right)$
5. 空心圆球		（1）单层空心球壁为$\frac{1}{2\pi\lambda}\ (\frac{1}{D_1}-\frac{1}{D_2})$ （2）多层空心球壁为$\frac{1}{2\pi}\sum\frac{1}{\lambda_i}(\frac{1}{D_i}-\frac{1}{D_{i+1}})$
6. 圆管外包上方形绝热材料		$\frac{1}{2\pi\lambda l}\ln 1.08\ \frac{a}{d}$ 适用于管道长度$l\gg d$
7. 单根热管道壁面对地面的导热		$\frac{1}{2\pi\lambda l}\ln\left[\frac{2Z}{d}+\sqrt{(\frac{2Z}{d})^2-1}\right]$ 适用于$l\gg d$当$Z\gg 2d$时，可简化为 $\frac{1}{2\pi\lambda l}\ln\frac{4Z}{d}$
8. 多根管子埋于地下		对每根管子$\frac{1}{2\pi\lambda l}\ln\left[\frac{2s}{\pi d}\times \text{sh}\ (2\pi\frac{Z}{s})\right]$ 适用于$l\gg d$

续上表

物 体 形 状	图 示	导 热 热 阻 R ℃/W
9．长方形管道埋于地下 $Z>b>a$		$\frac{1}{\lambda l\ (5.7+\frac{b}{2a})}\ln\frac{3.52}{a^{0.75}b^{0.25}}$ 适用于 $l\gg b$
10．无限大平板中的圆管排		$\frac{\ln\ (\frac{e}{\pi r}\cdot \mathrm{sh}\frac{\pi\delta}{e})}{2\pi\lambda l}$ $\delta>2r$ 对任一管子

2.2 材料之间的接触热导

当热流体通过两物体的接触表面时，由于材料表面不可能完全接触，因而导致在交界处有明显的温降。这表明两表面之间有接触热阻，其倒数称为接触热导。

图 1.1.5-3 为构成接触面的微观接触示意图，接触热导的定义式为

$$\frac{1}{R_{co}}=\frac{Q}{\Delta t_{co}A} \tag{1.1.5-14}$$

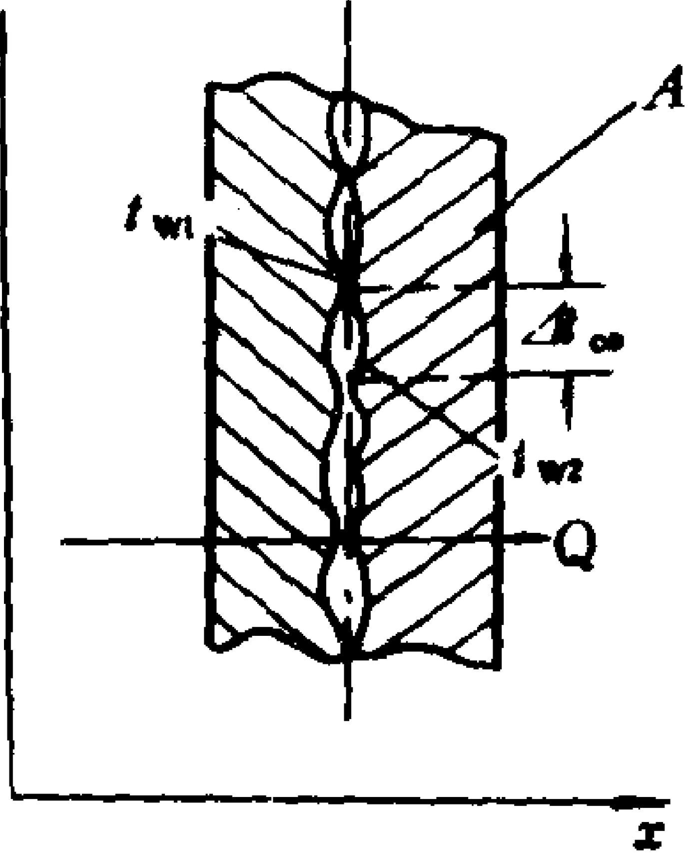


图 1.1.5-3 接触面的微观示意图

式中：A——名义接触面积，m^2；

Q——通过A的热流量，W；

Δt_{co}——两物体交界面处的温度降，K；

R_{co}——接触热阻，$m^2\cdot K/W$。

接触面间的热交换主要通过接触面之间的固体导热、交界面之间空隙中充填物的热传递以及隙缝间的热辐射来进行。可见在工程上为了强化传热，要尽可能减少接触热阻R_{co}，反之在低温贮藏的保温隔热等工程中又需要增加接触热阻。接触热导与表面平整度、粗糙度、接触压力、交界面温度以及接触材料的硬度、弹性系数、导热系数、表面氧化膜等因素有关。表面光滑平整、增大接触压力以及在接触面间放入低硬度、高导热系数的填充料都可减少接触热阻。目前，常用材料的接触热导值都是用实验方法确定的。现将几种常用材料的接触热导数据列于表 1.1.5-6。

表 1.1.5-6　　在大气中几种接触面的接触热导值〔2〕

A．不锈钢与不锈钢接触热导值			
接触面的表面状况	接触面的表面粗糙度均为 2.54 μm（均方值）接触面间的填料为空气		
压 力 P	接触热导 $1/R_{co}$　W/（$m^2\cdot K$）		
MPa	93℃	149℃	203℃
0.005	2100	2498	2724
0.09	2327	3008	3178
0.239	3008	3519	3746
0.423	3292	3916	4143

	接触面间的填料为黄铜垫片和空气		
0.005	2168	2667	2894
0.09	3179	3916	4296
0.239	4654	5223	5052
0.423	5506	5620	5676
	接触面间的填料为石棉垫片和空气		
0.005	504	551	567
0.09	624	681	681
0.239	738	738	851
0.423	794	738	907
接触面表面粗糙度均为 0.762 μm（均方值）接触面间的填料为空气			
0.005	6527	7946	9650
0.09	7379	10218	12482
0.239	9252	10955	13226
0.423	9252	12488	9249

B. 铝与铝以及铜与铜的接触热导值

材料及接触面间状况	表面粗糙度 μm	接触面温度t℃	接触面压力P MPa	接触热导 $1/R_{co}$ W/(m·k)
铝、空气	2.54	150	1.2～2.5	11436
铝、空气	0.25	150	1.2～2.5	56731
铝、空气	2.54	150	1.2～20	8106
铜、空气带有 0.025 mm厚的黄铜垫片	1.27	20	1.2～20	141829
铜、空气	3.81	20	1.0～5.0	56731

2.3 肋壁导热计算

肋壁的导热可根据图 1.1.5-4 所示的等截面直肋导热示意图所建立的微分方程来导出计算公式。

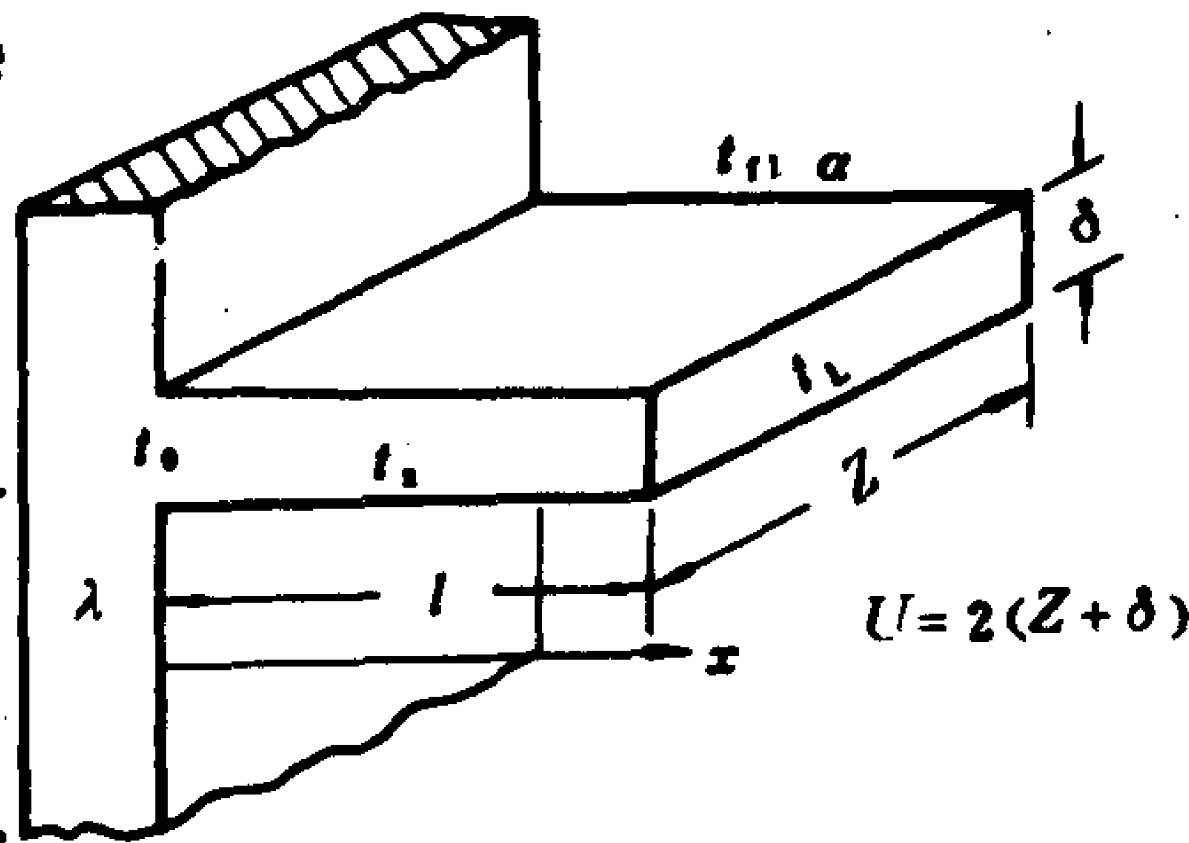


图 1.1.5-4 等截面直肋壁的导热示意图

为了简化肋壁导热的分析计算，设定了下列条件：

1)肋壁材料的导热系数不随温度而变化；

2)肋壁表面与周围流体和空间的总放热系数α为常数；

3)周围流体的温度t_f为常数；

4)肋片只沿高度方向有温度梯度，略去另外两个方向的温度梯度；

5)略去肋顶端部的散热量。

导出温度随肋高x的计算公式为

$$t_x - t_f = (t_0 - t_f)\ \frac{\mathrm{ch}[m\ (l-x)]}{\mathrm{ch}(ml)} \tag{1.1.5-15}$$

当$x=l$时，得肋端处的温度为

$$t_l = \frac{t_0 - t_f}{\mathrm{ch}(ml)} + t_f \tag{1.1.5-16}$$

通过肋根部（$x=0$处）的热流量为

$$Q_0 = \lambda f m\ (t_0 - t_f)\ \mathrm{th}(ml) \tag{1.1.5-17}$$

式中：$m=\sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda F}}$；$U$为肋的周边长度，m；

$$\mathrm{ch}(ml) = \frac{1}{2}\ (e^{ml} + e^{-ml});$$

$$\mathrm{sh}(ml) = \frac{1}{2}\ (e^{ml} - e^{-ml});$$

$$\mathrm{th}(ml) = \mathrm{sh}(ml)/\mathrm{ch}(ml)。$$

该肋在理想情况下被认为其各处温度皆等于肋根温度时的换热量，用下式表示为

$$Q = \alpha U l\ (t_0 - t_f) \tag{1.1.5-18}$$

可见该肋片的效率η_f为式（1．1．5-17）与式（1．1．5-18）之比值。

$$\eta_f = \frac{\lambda f m \mathrm{th}(ml)(t_0 - t_f)}{\alpha U l(t_0 - t_f)} = \frac{\mathrm{th}\ (ml)}{ml} \tag{1.1.5-19}$$

各种型式肋片的效率η_f值列于表 1.1.5-7 中。

表 1.1.5-7　　常用各种肋型的肋效率η_f

肋　片　形　状	肋　效　率　η_f
1．各种直肋 t_0　t_f　δ　E　l （A）等厚度直肋 （B）凸形抛物线形直肋 （C）三角形直肋 （D）（E）凹形抛物线型直肋	η_f：0　0.1　0.2　0.3　0.4　0.5　0.6　0.7　0.8　0.9　1.0 （A）（B）（C）（D）（E） 0　1.0　2.0　3.0　4.0　5.0 $\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda\delta}}\ l$

肋 片 形 状	肋 效 率 η_f
2．梯形直肋 梯形直肋的$\eta_f=\frac{\text{th}(ml)}{ml}+\Delta$ Δ查右侧线图。 th$(ml)/ml$值按梯形肋平均厚度为$\delta m=(\delta_0+\delta_1)/2$计算或用等厚度直肋线图中曲线（A）求得	
3．等厚度圆形环肋	
4．等厚度矩形环肋或顺排整张套片管	$\eta_f=\frac{\text{th}\,(mr_0\mu)}{mr_0\mu}$ $m=\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda\delta_0}}$　$\mu=(\rho-1)\quad(1+0.35\ln\rho')$ $\rho=\frac{R}{r_0}$　$\rho'=1.28\rho\sqrt{\frac{l}{R}-0.2}$

肋片形状	肋效率 η_f
5. 等厚度六边形环肋或错排整张套片管 R δ_0 l r_0	$\eta_f=\frac{th\ (mr_0\mu)}{mr_0\mu_0}$ $\rho'=1.27\rho\sqrt{\frac{l}{R}-0.3}$ 余同上

2.4 不稳定导热的线图计算法

物体被加热时其表面温度先升高，然后由表及里地逐次提高温度。若加热时间足够长，并且加热介质的温度维持不变为t_f，则最终物体各处皆达到t_f而趋于平衡。物体各处温度随时间τ变化的过程称为不稳定导热过程。求解不稳定导热问题的目的是：

1)确定在某一时刻τ物体某处的温度值t_x。

2)确定在该加热或冷却过程中物体经时间τ和外界所交换的热量Q_τ。

应用数学分析法可解这一无内热源常物性物体的一维不稳定导热问题，其解可表示为下列无因次量组成的函数形式。

$$\frac{\theta_x}{\theta_c}=f_1\left(\frac{\alpha l}{\lambda},\ \frac{x}{l}\right) \tag{1.1.5-20}$$

$$\frac{\theta_c}{\theta_i}=f_2\left(\frac{\alpha l}{\lambda},\ \frac{a\tau}{l^2}\right) \tag{1.1.5-21}$$

$$\frac{\theta_m}{\theta_i}=f_3\left(\frac{\alpha l}{\lambda},\ \frac{a\tau}{l^2}\right) \tag{1.1.5-22}$$

式中：θ_x/θ_c——物体任一处的过余温度无因次量，$\theta_x=t_x-t_f$，t_f为外界介质温度；

$\theta_c=t_c-t_f$，t_c为物体中心点、中心面，或中心线上温度；

θ_c/θ_i——物体中心处的过余温度无因次量，$\theta_i=t_i-t_f$为物体初始过余温度；

θ_m/θ_i——物体平均过余温度的无因次量，$\theta_m=t_i-t_m$，t_m为物体在时间τ的平均温度值；

$\alpha l/\lambda$——毕渥准数，它是物体内部导热热阻l/λ与物体界面与外界换热热阻$1/\alpha$的比值；

$a\tau/l^2$——傅立叶准数，是反映物体不稳定导热时与时间τ有关的无因次量；

x/l——反映不同几何位置的无因次量，对平壁定形尺寸l用平壁的一半厚度δ，对圆柱或圆球l为半径R，在线图中以r/R来表示。

2.4.1 求大平壁t_c、t_x以及t_m的线图

图 1.1.5-5 的纵坐标为θ_c/θ_i，横坐标为Fo，参变量为 $1/B_i=\frac{\lambda}{\alpha\delta}$。根据给定的参数计算出$Fo$以及$B_i$值，查线图可求得$\theta_c/\theta_i$值，由于$t_i$、$t_f$为已知值。故$t_c$可求出。

同理，已知x/δ和 $1/B_i$，可由图 1.1.5-6 求得大平壁中任意处的温度t_x。图 1.1.5-7 为已

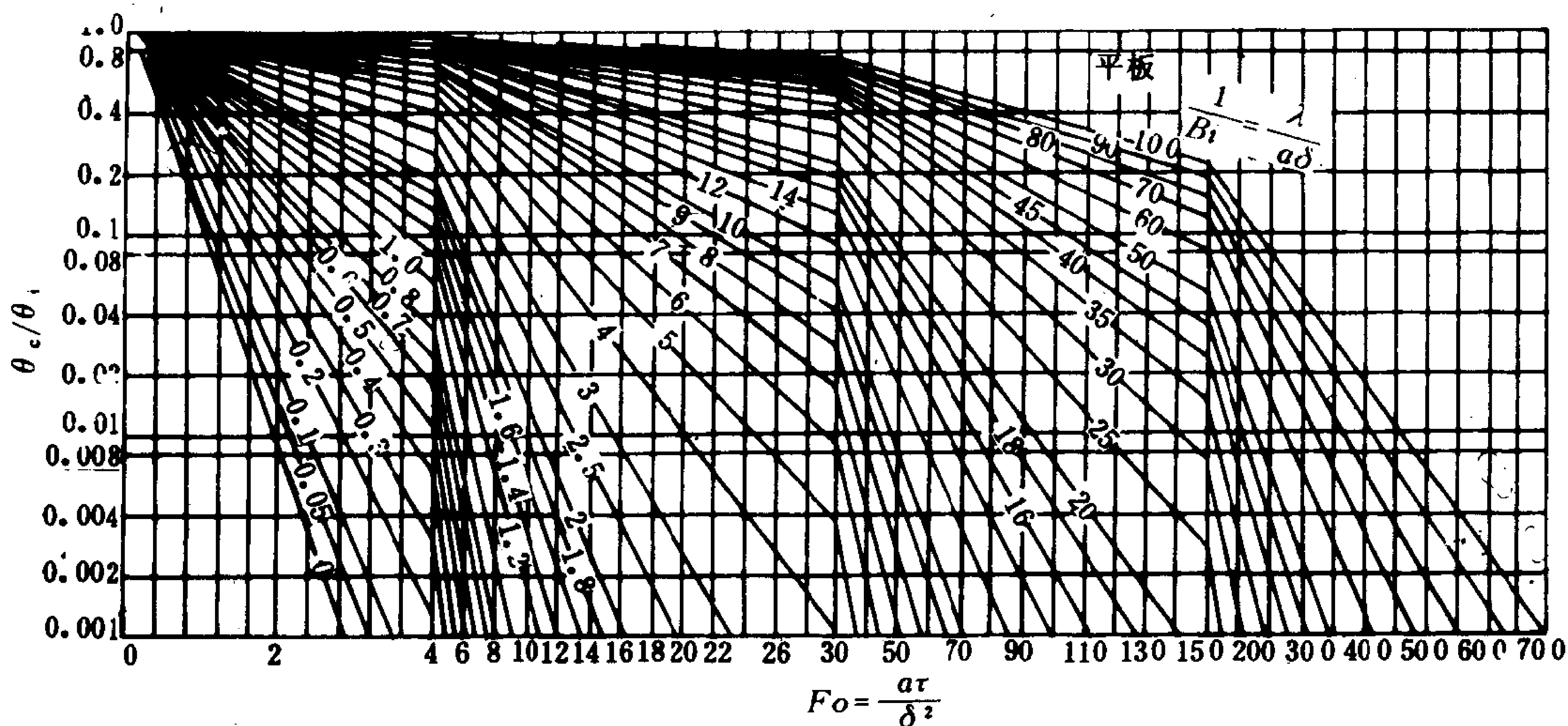


图 1.1.5-5 求大平壁中心面处过余温度θ_c的线图

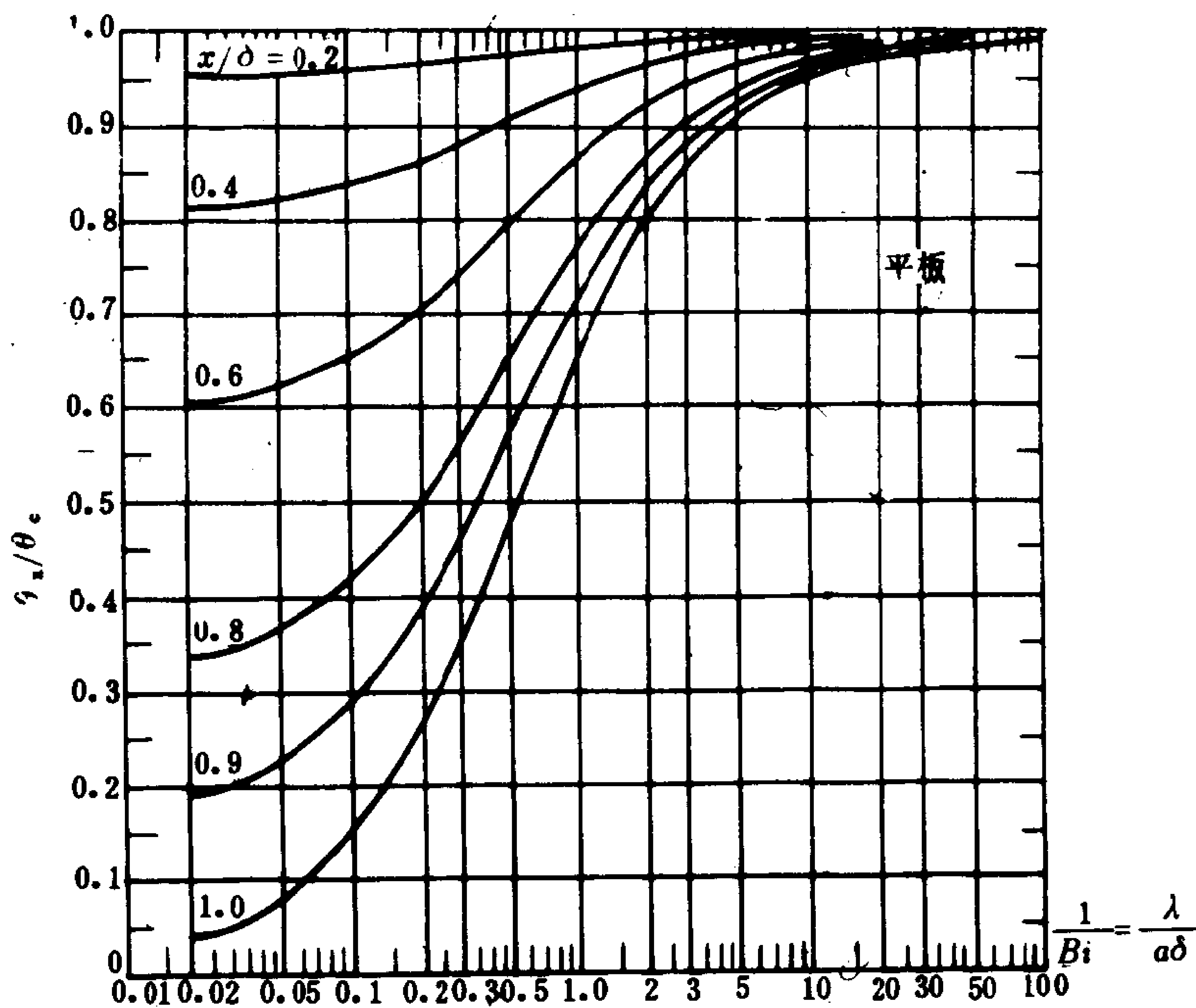


图 1.1.5-6 求大平壁任意位置过余温度θ_x的线图

知B_i及Fo值求大平壁平均温度t_m的线图。

按下式确定x处τ时刻的温度t_x值:

$$t_x=(\frac{\theta_c}{\theta_i})(\frac{\theta_x}{\theta_c})\cdot\theta_i+t_f \tag{1.1.5-23}$$

若要求τ时刻大平壁与外界的换热量Q_τ,可用图 1.1.5-7 求得的θ_m值,按下列公式计算:

$$Q_\tau=C_p\cdot\rho\cdot V\cdot\theta_m \tag{1.1.5-24}$$

式中,C_p,ρ、及V为大块平壁的比热,密度和体积。

2.4.2 长圆柱的线图

求θ_c、θ_r、θ_m及Q_τ的方法同前一节所述。

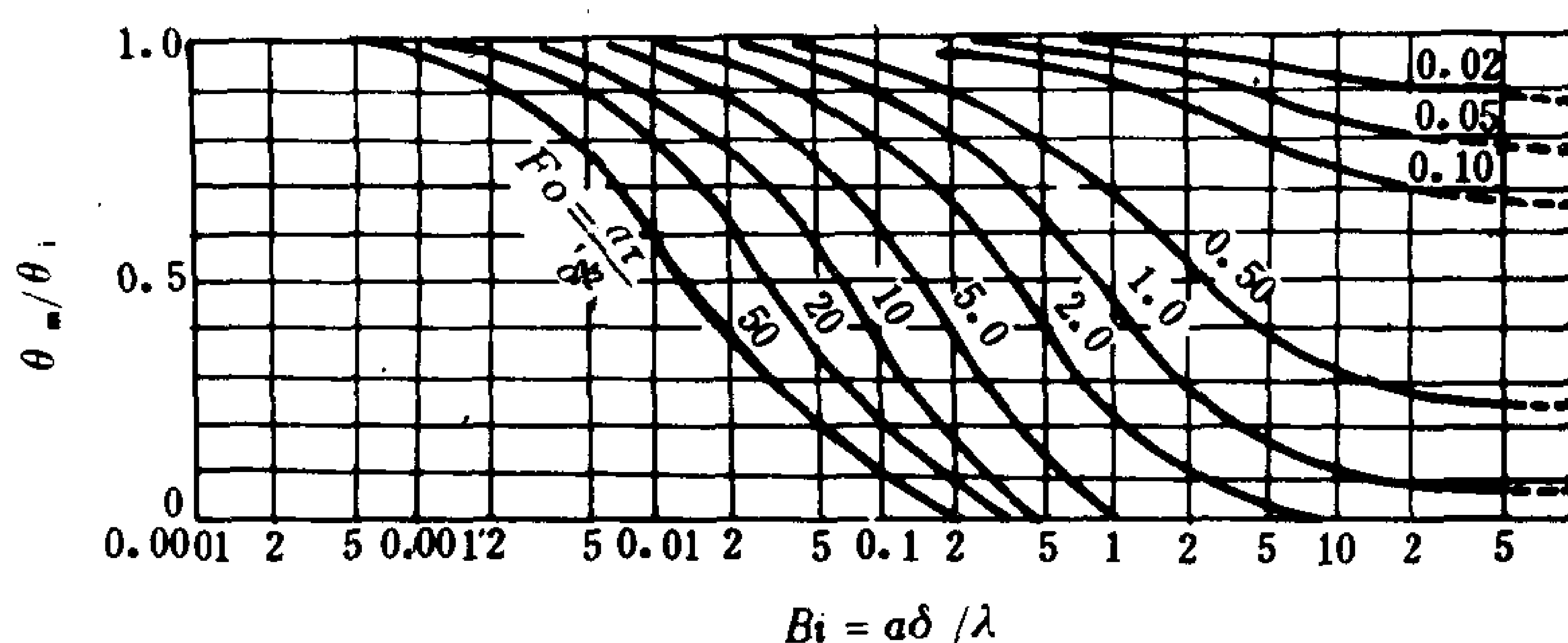


图 1.1.5-7　求大平壁平均过余温度θ_m的线图

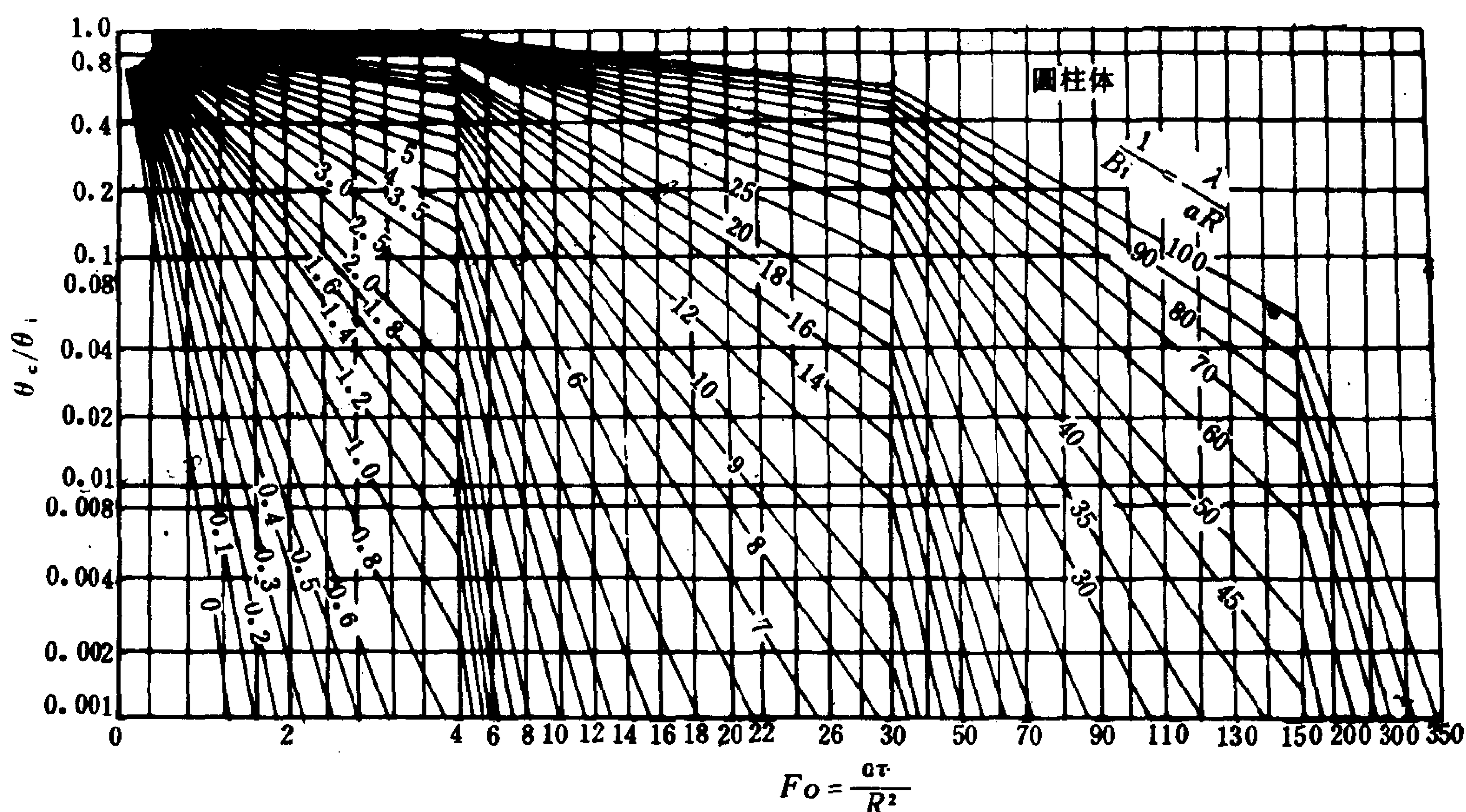


图 1.1.5-8　求长圆柱中心处过余温度θ_c的线图

2.4.3　圆球的线图

求θ_c、θ_r、θ_m及Q_τ的方法同前节所述。

2.4.4　短圆柱和直角圆柱体的不稳定，导热线图计算

长度为l、直径为d的矩圆柱体，可以看成是由直径为d的长圆柱与厚度为l的大平壁垂直相交时所形成的物体。短圆柱周边上的无因次过余温度θ/θ_i等于长圆柱表面上的θ/θ_i与大平壁外表面的θ/θ_i的乘积。同理短圆柱端面中心处的θ/θ_i等于长圆柱中心的θ_c/θ_i与大平壁外表面的θ/θ_i的乘积，可见短圆柱体任一点的θ/θ_i都可用类似方法求得。

直角柱的长柱可以看成是由两个大平壁垂直相交所形成的物体。短直角柱可以看成是由三个大平壁垂直相交所形成的物体。计算方法同上。

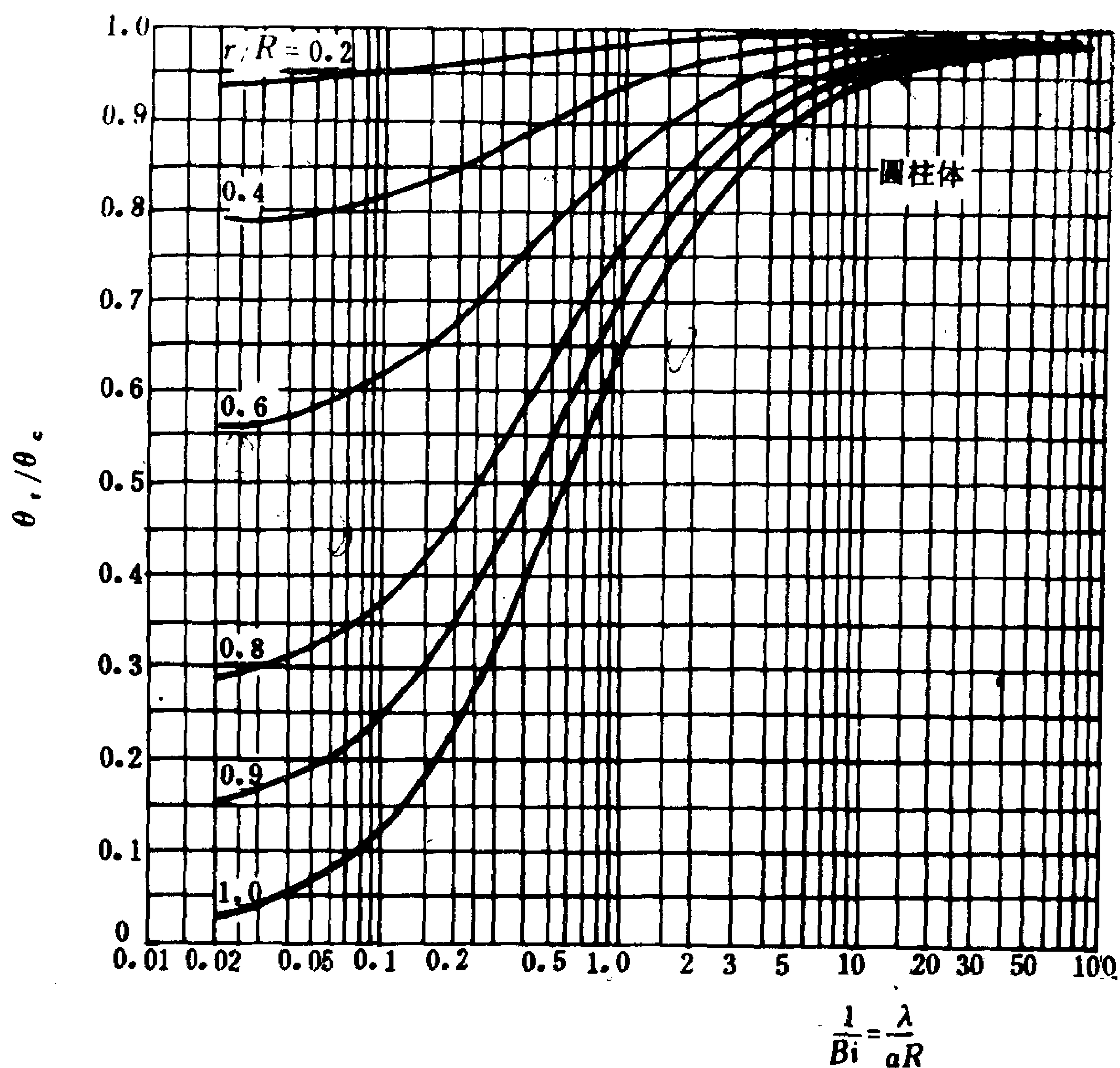


图 1.1.5-9　求长圆柱任意位置处过余温度θ_r的线图

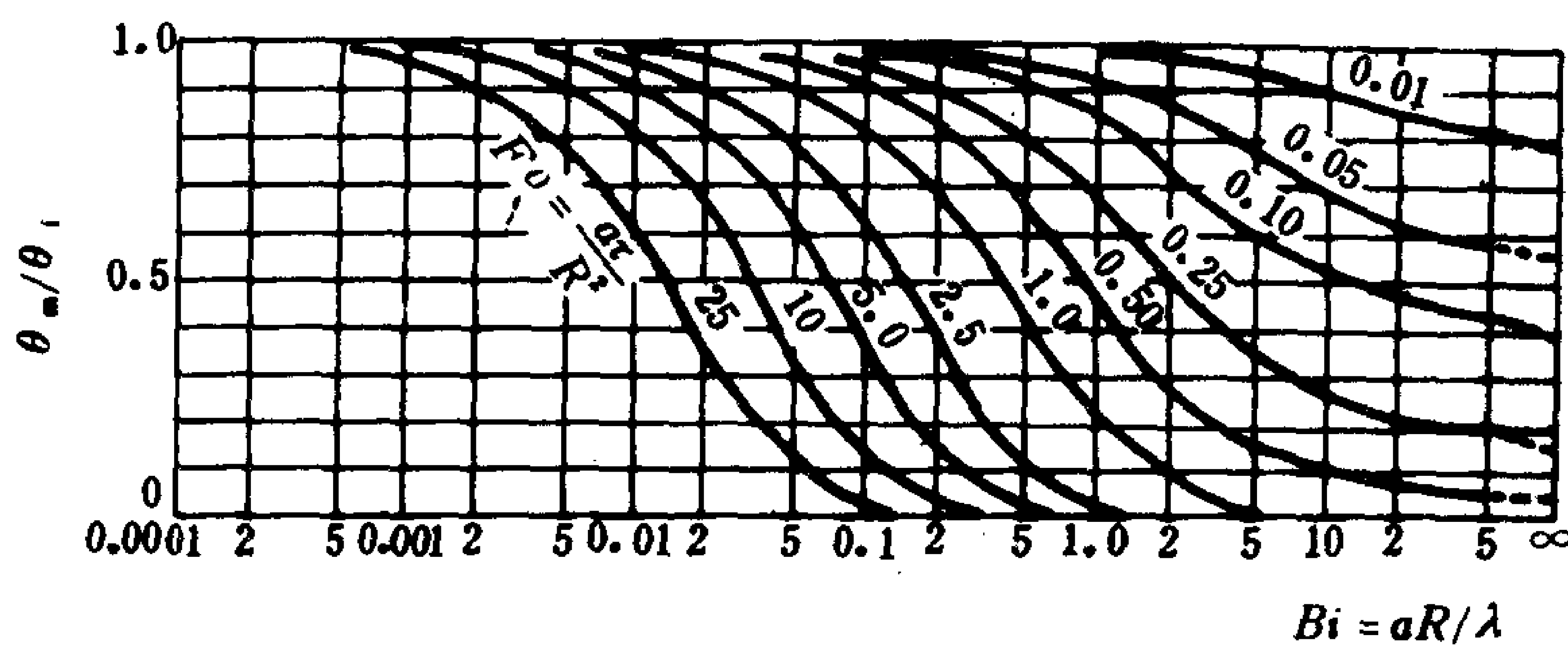


图 1.1.5-10　求长圆柱平均过余温度θ_m的线图

2.5　不稳定导热的集总热容法

工程上，若被加热或冷却的物体尺寸较小，并且该物体的导热系数λ又较大，其导热热阻l/λ与物体表面的换热热阻$1/\alpha$的比值，即毕渥数$B_i=\alpha l/\lambda$就很小。把$B_i<0.1$的被加热或冷却物体内温度可看作是均一的温度。因此该物体得失的热量可用单一的温度变化和比热来求得。这种理想化的物体称为集总热容物体。它使不稳定导热的计算大为简化。定形尺寸$L=V/F$。

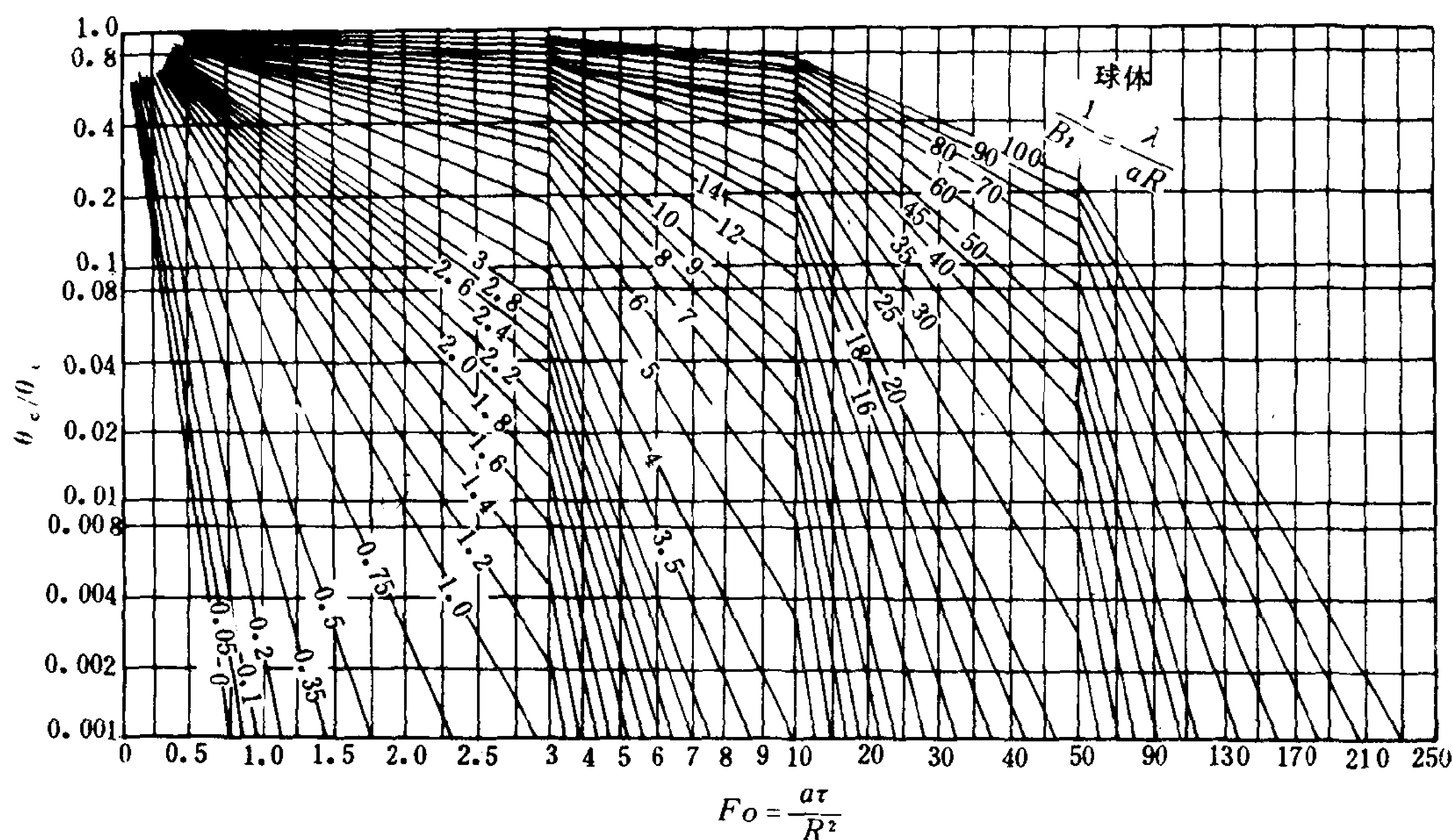


图 1.1.5-11　圆球中心处过余温度θ_c的线图

工程上把$B_i=\alpha l/\lambda$这一无因次量小于 0.1 的不稳定导热过程用集总热容法来计算，其误差小于 5％。

用集总热容法计算温度随时间的变化关系公式为

$$\frac{t-t_f}{t_i-t_f}=\exp(-\frac{\alpha F}{c\rho V})\ \tau \tag{1.1.5-25}$$

式中：α——物体对流体的总换热系数，W/（m²·K)；

F——物体表面积，m²；

C——物体的比热，J/(kg·K)；

ρ——物体的密度，kg/m³；

V——物体的体积，m³；

t——物体的瞬时温度，℃；

t_i——物体的初始温度，℃；

t_f——流体的温度，℃。

例：一直径为 0.5 mm的热电偶，其材料为铜及康铜组成，初始温度为25℃，被置入温度为300℃的烟气中。已知烟气对热电偶的换热系数α为 50 W/（m²·K)，试问热电偶的过余温度为初始过余温度的 10%时需要多少时间？这时热电偶所指示的温度是多少？

解：这一不稳定导热问题可按$r=0.25$ mm的圆球用集总热容方法求解，热电偶材料可近似用纯铜的物性参数值，查表 1.1.5-1 得

$\rho=8933$ kg/m³，$c=385$ J/（kg·K)，$\lambda=401$ W/（m·K)。

代入式（1.1.5-20）求τ值：

$$0.1=\exp\left(-\frac{50\times4\pi\times0.00025^2}{385\times8933\times(4/3)\times\pi\times0.00025^3}\right)\tau$$

$$0.1=e^{-0.1744\tau}$$

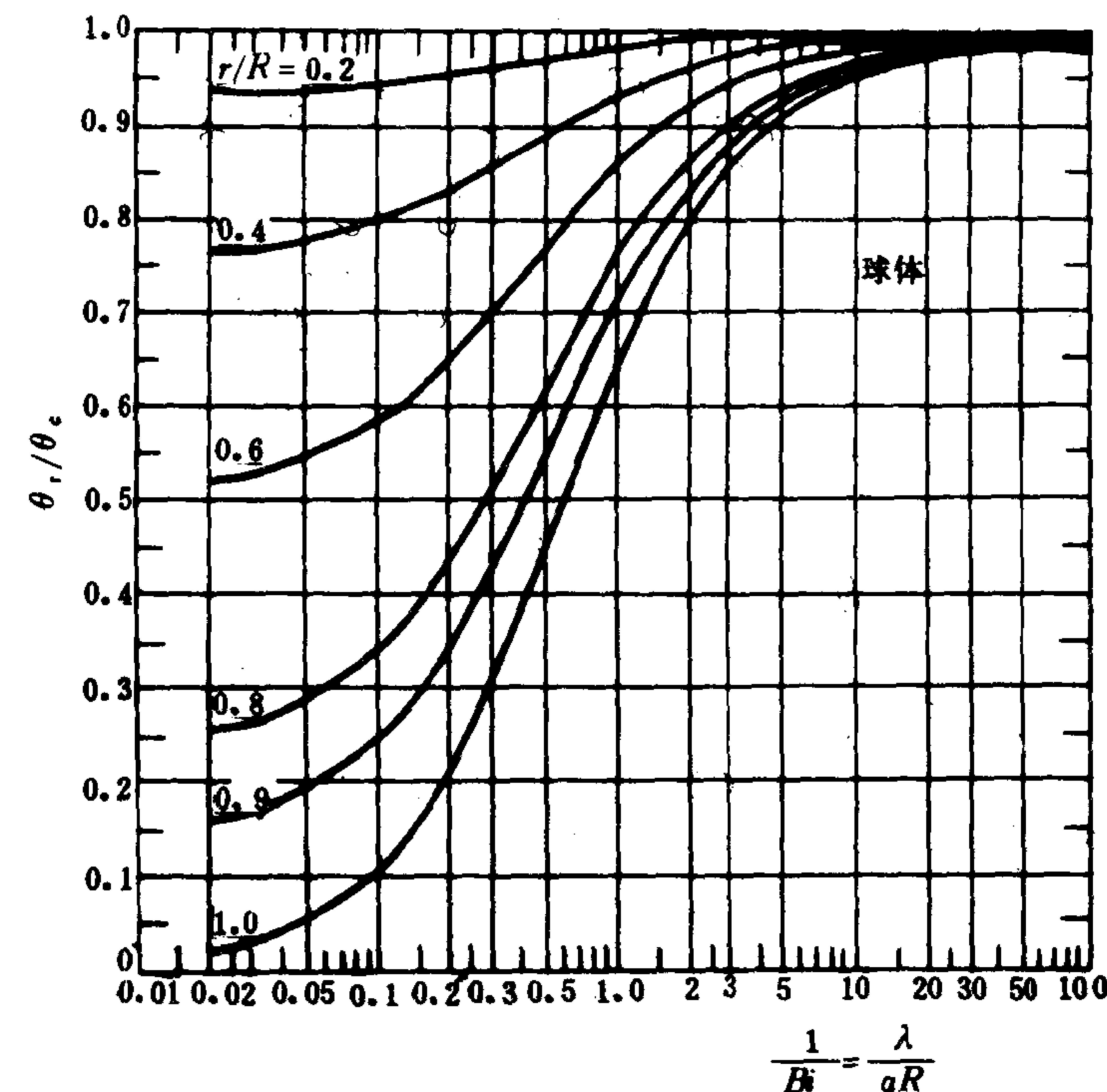


图 1.1.5-12 圆球任意位置过余温度θ_r的线图

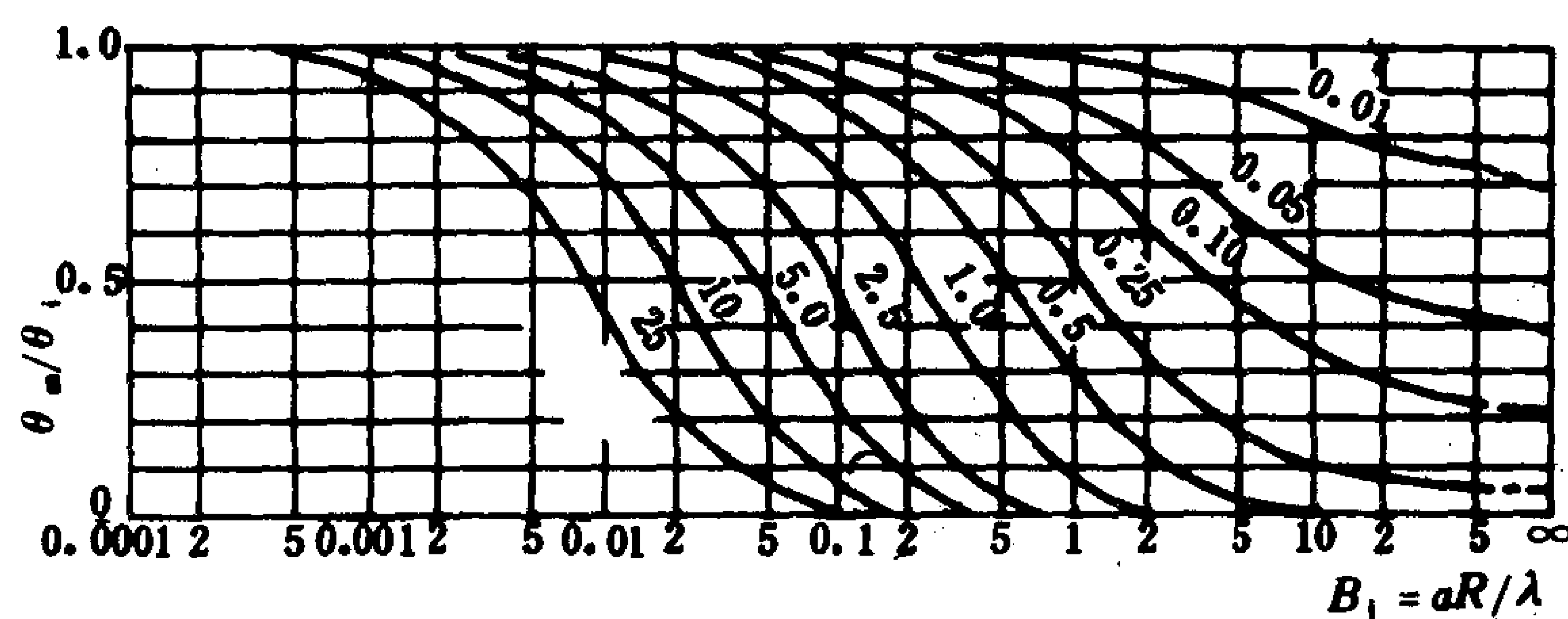


图 1.1.5-13 圆球平均过余温度θ_m的线图

$$\tau=13.2\ \mathrm{s}$$

热电偶经过 13.2 s测得的温度其过余温度为初始过余温度的10%。

这时热电偶指示的温度t为

$$\frac{t-t_f}{t_1-t_f}=0.1$$

则 $t=0.1(25-300)+300$
$=272.5℃$

可见 0.5 mm直径的热电偶不能用来测出内燃机排出烟气的温度瞬时值，因为其响应时间太长。

3 对流换热

对流换热是指流体与物体表面直接接触而又具有相对运动的热传递过程。热量的传递依靠流体流动形成的热对流以及通过流体的导热来进行。因此，对流换热的机理与流体的导热性以及流体相对于物体表面运动的特点有关。按流体产生运动的原因可分为自然对流和强制对流；按流体运动的空间大小可分为无限空间和有限空间；按流体是否有沸腾或凝结的相变特征可分为无相变和有相变。例如机舱中内燃机排气管壁对空气的对流换热是无限空间中无相变的空气对圆筒壁的自然对流换热；蒸汽锅炉沸水管内壁对水的加热汽化过程以及制冷蒸发器管壁对$R12$的加热蒸发过程是有相变的管内强制对流沸腾对流换热。研究对流换热的目的是确定对流换热系数α的数值以及了解影响α值的各种因素。

3.1 对流换热原理

图 1.1.5-14 a）是流体外掠平壁速度边界层和热边界层的示意图，b）是平壁x处局部换热系数α_x的变化规律。

图示来流速度为W_∞，温度为t_f，壁温为t_w。流体受壁面摩擦阻力的影响，其流速从紧贴

壁面处的零值变到速度边界层最外缘的 $0.99W_\infty$。在这一速度边界层厚度δ内有明显的速度梯度。速度边界层厚度δ随x值逐渐增厚，其流动特点具有层流的特征。

流体温度在紧贴壁面处为t_w，在速度边界层具有层流特征的情况下，流体没有y向的流动，因此在y方向上的热传递具有导热的特点。流体温度从t_w变化到$t-t_w=0.99(t_f-t_w)$处，这一有明显温度梯度的范围称作热边界层，其厚度用δ_t表示。在热边界层内热传递以导热方式进行，因此可用傅立叶导热定律和牛顿冷却定律写出描述对流换热过程的方程

$$\alpha=-\frac{\lambda}{t_w-t_f}\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0} \quad (1.1.5\text{-}26)$$

此方程称为对流换热微分方程。由此式可知对流换热系数α与流体的λ值以及影响温度梯度$\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0}$的一切因素有关。热边界层$\delta_t$愈薄$\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0}$愈大，因此$\alpha_x$随$\delta_t$的增厚而减小。图 1.1.5-b）表示出这一变化。δ_t与速度边界层厚度δ成比例变化。对于空气等通常气体以及水，δ_t接近于δ；对于油类液体，δ大于δ_t；而对于液态金属水银等，δ_t则大于δ值。

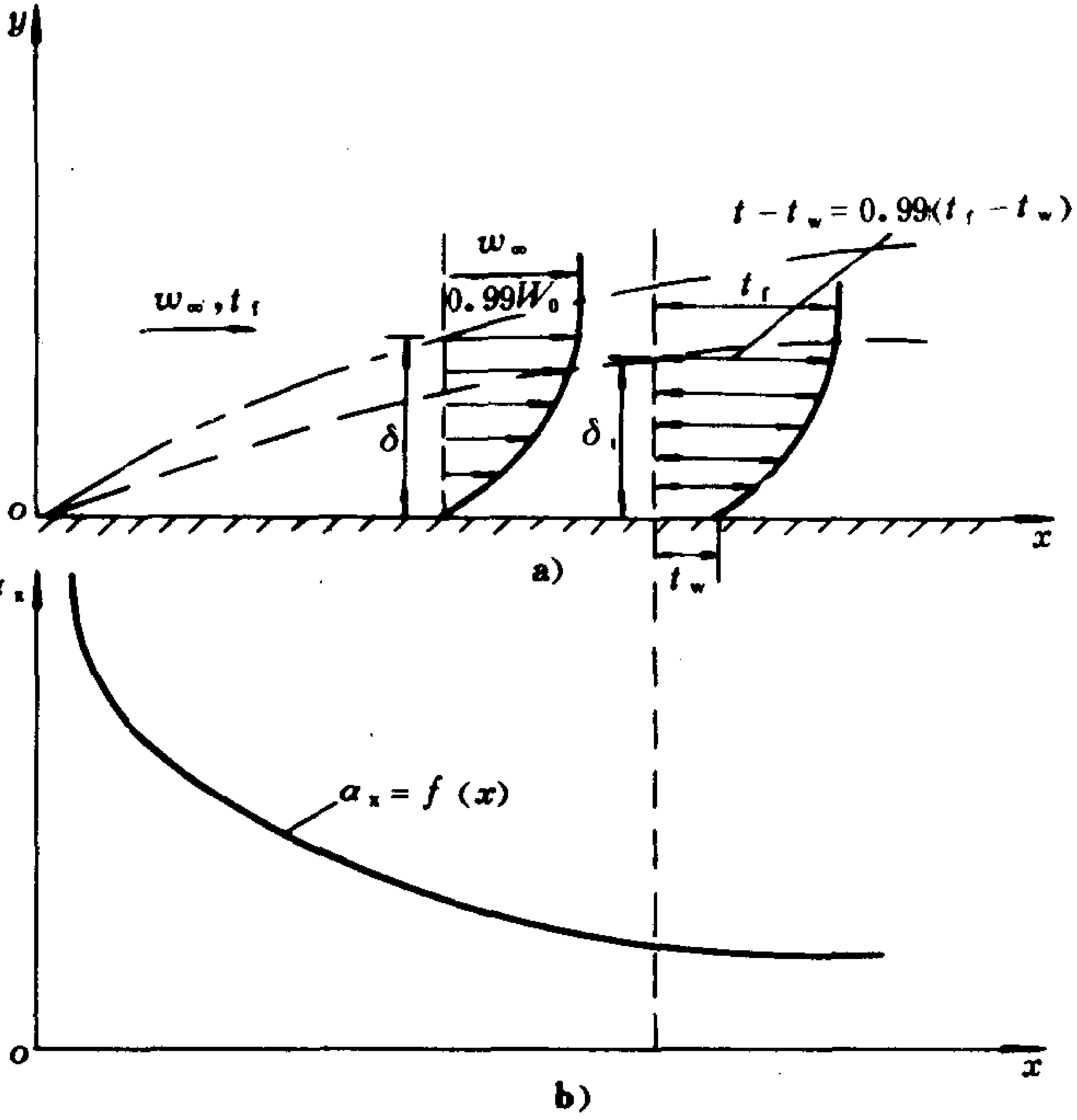


图 1.1.5-14　边界层示意图和α_x变化图

从以上分析可知α值与流体速度W，导热系数λ，密度ρ、运动粘度ν、比热C_p以及物体形状尺寸等因素有关。求解α的方法有实验法、数学分析法、相似准则综合实验数据的半经验法以及热量和动量类比法。其中半径验法在轮机工程中较为实用。现把该方法中常用的相似准则数，也称无因次准则数列于表 1.1.5-8。

准则数中表示流体物性的参数值都是温度的函数。我们把选取物性参数值所依据的温度称定性温度。在准则数右下角标出f表示以流体温度t_f为定性温度，同理W是表示以壁面温度t_w为定性温度。

表 1.1.5-8　　对流换热计算中常用的准则数

准则数名称	符　号	组　成	物理意义	组成中各量名称
努赛特数	Nu	$\frac{\alpha L}{\lambda}$	反映对流换热强度	α——换热系数 λ——导热系数
葛拉晓夫数	Gr	$\frac{\beta g\Delta t L^3}{\nu^2}$	反映自然对流影响	L——定形尺寸 β——体胀系数对理想气体

续上表

准则数名称	符 号	组 成	物理意义	组成中各量名称
普朗特数	Pr	$\frac{\nu}{a}$	反映流体物性影响	$\beta=\frac{1}{T}$ g——重力加速度
雷诺数	Re	$\frac{WL}{\nu}$	反映流动状态	Δt——壁面与流体温差的绝对值 ν——运动粘度
斯坦登数	St	$\frac{\alpha}{GC_p}$	反映强制对流影响 $St=\frac{Nu}{Re\cdot Pr}$	a——导温系数 W——流速 G——单位时间通过单位截面积的质量 C_p——定压比热

3.2 强制对流换热

凡因外力、如水泵、风机的运转引起流体运动对壁面的换热过程称为强制对流换热。

3.2.1 管内换热

流体在各种不同形状截面管道的对流换热过程有着共同的规律性，因此工程上把这一类型的大量对流换热实验数据整理成准则方程，供计算换热系数α用。各种准则方程都有其规定的适用范围。表1.1.5-9列出管内对流换热的计算式。准则中的定形尺寸为水力直径de，de= $4f/U$，式中f为流体流经的截面积；U为与流体接触的流通截面周边长度，称作湿周。

3.2.2 外掠物体对流换热

流体外掠换热壁面的换热系数α与物体的形状、流体相对于壁面的流向有较大影响。表1.1.5-10所列计算式为计算外掠平壁、单圆管、圆管束、椭圆管束、带肋片圆管束等较实用的求α公式。若流体的流动方向与管轴线不垂直时，应乘以修正系数ε_β，其值列于表1.1.5-10的最后一栏中。

表1.1.5-9 **管内对流换热计算式**

流动状态	准 则 方 程						适用范围，定性温度及定形尺寸
层 流	$Nu_t=1.86\,(Re_t\cdot Pr_t\cdot de/l)^{0.33}\,(\frac{\eta_f}{\eta_w})^{0.14}$ 式中：de——管道当量直径； l——管长。						$Re_f<2200$，$Pr>0.6$；定性温度按准则的角标，定形尺寸用管道截面的当量直径
过渡区	$Re_t\times10^{-3}$	2.2	2.5	3.0	4.0	5.0	$Re_t=2200\sim10000$ 定性温度按角标选t_f或t_w，定形尺寸用管道截面的当量直径
	$\frac{Nu_t}{Pr_t^{0.43}\,(\frac{Pr_t}{Pr_w})^{0.25}}$	2.2	4.9	7.5	12.2	16.5	
	$Re_t\times10^{-3}$	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
	$\frac{Nu_t}{Pr_t^{0.43}\,(\frac{Pr_t}{Pr_w})^{0.25}}$	20	24	27	80	33	
湍 流	$Nu_t=0.023Re_t^{0.8}Pr_t^{0.4}\varepsilon_l\varepsilon_R\varepsilon_t$						$Re_t=10^4\sim1.2\times10^5$， $Pr_t=0.7\sim120$；

续上表

流动状态	准则方程	适用范围，定性温度及定形尺寸
管长修正系数ε_l	曲率修正系数ε_R	温差修正系数ε_t
当$L/de<50$时应考虑修正	对弯管应修正， R为弯管的曲率半径 对空气$\varepsilon_R=1+1.77\frac{de}{R}$ 对液体$\varepsilon_R=1+10.3(\frac{de}{R})^3$	t_f与t_w温差较大时应修正 气体被加热$\varepsilon_t=(T_f/T_w)^{0.5}$ 气体被冷却$\varepsilon_t=1.0$ 液体被加热$\varepsilon_t=(\eta_f/\eta_w)^{0.11}$ 液体被冷却$\varepsilon_t=(\eta_f/\eta_w)^{0.25}$

湍流换热简化公式

对空气、烟气$\alpha=\varepsilon_l\varepsilon_R\varepsilon_t A W^{0.8} d_e^{-0.2}$

在接近大气压力，400℃以下对空气$A=3.489\ (1-8.26\times10^{-4}t_f)$

$A=3.69\ (1-8.26\times10^{-4}t_f)$

对水、过热蒸汽　$\alpha=\varepsilon_l\varepsilon_R\varepsilon_t B(\rho_w)^{0.8}d_e^{-0.2}$

水在80～190℃ $B=8.37\ (1+0.006t_f)$

过热水蒸汽在4 MPa左右　$B=6.71$

表1.1.5-10　**外掠物体对流换热计算式**

换热面形状	准则方程
1、外掠平壁	当$Re_f>10^5$、$Pr_f>0.6$的空气、烟气、水和各种油 $Nu_f=0.037\ Re_f^{0.8}\cdot Pr_f^{0.43}\ (Pr_f/Pr_w)^{0.25}$　当$Re_f<10^5$，$Pr_f>0.6$ $Nu_f=0.76\ Re_f^{0.5}\ Pr_f^{0.43}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$　板长l为定形尺寸
2、横掠单圆管	当$Re_f=5\sim1000$，$Pr_f=0.71\sim350$ $Nu_f=0.5\ Re_f^{0.8}\ Pr_f^{0.38}\ (Pr_f/Pr_w)^{0.25}$ 当$Re_f=1\times10^3\sim2\times10^5$，$Pr_f=0.71\sim350$ $Nu_f=0.25\ Re_f^{0.8}Pr_f^{0.38}\ (Pr_f/Pr_w)^{0.25}$ 定形尺寸为园管外径
3、横掠顺列管束	当$Re_f=100\sim2\times10^5$，$Pr_f=0.6\sim500$对n列管束的平均α值 $Nu_f=0.27\ Re_f^{0.63}\ Pr_f^{0.36}\ (Pr_f/Pr_w)^{0.25}\varepsilon_n$ 定性温度用管束中流体的平均温度t_f 定形尺寸用圆管外径，流体w是截面最窄处流速

总排数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10以上
ε_n	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	1.00

换热面形状	准则方程
4、横掠错列管束（S_1为横向管距S_2为纵向管距）	当$Re_f=100\sim2\times10^5$，$Pr_f=0.6\sim500$ 对n列管束的平均α值，当$S_1/S_2\leq2$时 $Nu_f=0.35\ Re_f^{0.6}\ Pr_f^{0.36}\ (Pr_f/Pr_w)^{0.25}\varepsilon_n$ 当$S_1/S_2>2$时 $Nu_f=0.40\ Re_f^{0.6}\ Pr_f^{0.36}\ (Pr_f/Pr_w)^{0.25}\varepsilon_n$

总排数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10以上
ε_n	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00

换热面形状	准则方程
5．横掠错列椭圆管束	$Nu_f=0.236\ Re_f^{0.62}\ Pr_f^{0.33}$ 定形尺寸用当量直径$de=ab/\sqrt{(a^2+b^2)/2}$ a、b—椭圆的长轴与短轴
6．横掠圆肋片圆管管束（正三角形叉排）	$Re_f=10^3\sim2\times10^4$　$Nu_f=0.134\ Re_f^{0.681}\ Pr_f^{0.33}\ (\frac{p-\delta}{l})^{0.2}\ (\frac{p-\delta}{\delta})^{0.11}$ $Re_f=1.5\times10^4\sim5\times10^5$ $Nu_f=0.189\left[1+0.1\ (\frac{S_1}{d_0}-2)\right]Re_f^{0.685}\ Pr_f^{0.33}\ (\delta/l)^{0.304}$ 定形尺寸为管外径d_0，p为肋距，δ为肋厚，l为肋高，d_0为管外径，S_1为横向管距。
7．横掠大块平肋套管（正三角形叉排管束）	$St_f=1.2\ [1-0.217\ (\frac{l}{p})^{0.469}]\ \times\ (\frac{d_e}{Re_f})^{\frac{3}{8}}\cdot Pr_f^{-\frac{2}{3}}$ $St=\frac{Nu}{Re\cdot Pr}$，l，p，d_e的定义同上。 此式引自Mc Quiston在ASHRAE Trans.上发表的论文（vol 78、1972）

不同冲角β的修正系数$\varepsilon\beta$值

β	90～80°	70°	60°	45°	30°	15°
单管和顺列管束	1.0	0.97	0.94	0.83	0.70	0.41
错列管束	1.0	0.97	0.94	0.78	0.53	0.41

3.3 自然对流换热

流体受壁面加热或冷却而引起的自然对流换热是与流体各处温度不等所造成的浮升力有关。在热壁面上的空气被加热而上浮，而未被加热的冷空气因密度较大而下沉。因此换热表面附近的流体不像强制对流那样朝同一方向流动。

3.3.1 无限空间自然对流换热

无限空间是指换热面附近流体的运动状况只决定于换热面的形状、尺寸与温度，而与空间围护壁面无关。机舱内蒸汽管壁对空气的换热、电冰箱外壳对室内空气的换热都属于这一情况。对$Pr>0.7$的各种流体，可用下列准则方程确定α值。

横置圆管，其$(Gr\cdot Pr)_f=10^3\sim10^8$范围。

$$Nu_f=0.50\ (Gr\cdot Pr)_f^{0.25}\ \ (Pr_f/Pr_w)^{0.25} \qquad (1.1.5\text{-}27)$$

竖管或竖壁，其$(Gr\cdot Pr)_f=10^3\sim10^9$范围。

$$Nu_f=0.76\ (Gr\cdot Pr)_f^{0.25}\ \ (Pr_f/Pr_w)^{0.25} \qquad (1.1.5\text{-}28)$$

式中，所用定形尺寸，对横管取外径，对竖管或竖壁取高度，对空气由于Pr值随温度变化不大，可略去公式中的(Pr_f/Pr_w)项。但对液体因Pr数随温度变化较大，此项影响不可忽略。对热面朝上的平板可近似用1.1.5-27式计算。

3.3.2 有限空间自然对流换热

流体在夹层两侧壁温不等的空间内进行对流换热时，与热壁面接触的流体受热上升。当

上升的热流体接触到冷壁面又因降温而下沉。流体在夹层中作热对流运动将热量从热壁面传递给冷壁面，其热流密度q为

$$q=\varepsilon_\lambda\cdot\lambda\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta}=\lambda_e\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta} \tag{1.1.5-29}$$

式中：$\varepsilon_\lambda=\frac{\lambda_e}{\lambda}$——有限空间自然对流系数；

λ——流体导热系数；

δ——夹层的厚度；

λ_e——当量导热系数。

表 1.1.5-11 列出气体在垂直夹层和水平夹层中求当量导热系数的公式。

表 1.1.5-11　　有限空间自然对流换热计算式〔3〕〔5〕

夹层形状	计算公式	适用范围
1．竖夹层（h为夹层高）	$\varepsilon_\lambda=0.18Gr^{1/4}\left(\frac{\delta}{h}\right)^{1/9}$ $\varepsilon_\lambda=0.065Gr^{1/3}\left(\frac{\delta}{h}\right)^{1/9}$ 定形尺寸为夹层厚度δ，定性温度为夹层两侧平均温度 $(t_{w1}+t_{w2})/2$，以下同此。	$Gr=2\times10^4\sim2\times10^5$，空气 $Gr=2\times10^5\sim1.1\times10^7$，空气
2．横夹层（热面在下侧）	$\varepsilon_\lambda=0.195Gr^{1/4}$ $\varepsilon_\lambda=0.068Gr^{1/3}$	$Gr=10^4\sim4\times10^5$，空气 $Gr>4\times10^5$，空气
3．倾斜夹层（热面在下侧，水平夹角为θ）	$\varepsilon_\lambda=1+1.446\left(1-\frac{1708}{Gr\cdot Pr\cdot\cos\theta}\right)$ $\varepsilon_\lambda=0.229(Gr\cdot Pr\cdot\cos\theta)^{0.252}$ $\varepsilon_\lambda=0.157\ (Gr\cdot Pr\cdot\cos\theta)^{0.285}$	$1708<Gr\cdot Pr\cdot\cos\theta<5900$ $5900<Gr\cdot Pr\cdot\cos\theta<9.23\times10^4$ $9.23\times10^4<Gr\cdot Pr\cdot\cos\theta<10^6$
4．环形夹层（热面在内环）	$e_\lambda=0.135\left(\frac{Pr^2\cdot Gr}{1.36+Pr}\right)^{0.28}$	$\frac{Pr^2Gr}{1.36+Pr}=3.16\times10^3\sim10^8$ $\frac{\delta}{d_1}=0.25\sim3.25$（$d_1$为内环直径）

3.4　凝结对流换热

各种蒸汽流经低于其饱和温度的冷壁面时，将在壁面上凝结为液体，并把热能传递给壁面。液体润湿壁面，形成液膜呈膜层凝结。若液体不润湿壁面，则形成液滴呈珠状凝结。在轮机工程中水蒸汽、氟利昂蒸汽在金属壁面上皆为膜状凝结。蒸汽在冷凝器管束的管外凝结时，因蒸汽流速较小可略去其对凝结换热系数α的影响。当蒸汽在管内流动凝结时，蒸汽流速将使液膜变薄，α值增大。当蒸汽中含有空气这一类不易冷凝的气体时，在冷凝面液膜与蒸汽之间积聚有空气成分较多的混合物，因而使凝结换热系数α显著降低。几种常用的凝结对流换热系数计算式列于表 1.1.5-12。

3.5　沸腾对流换热

液体在蒸汽锅炉、造水设备以及制冷装置的蒸发器中被壁面加热而沸腾。沸腾时有大量蒸汽汽泡在加热面生成、长大、跃离壁面、冲出液面而形成蒸汽。这种泡状沸腾对流换热系数α与热流密度q、温差$\Delta t=t_w-t_s$以及液体的物性有关。在大空间中处于 0.1 MPa到 4 MPa之间，水的沸腾换热系数α计算式为

表 1.1.5-12　　蒸汽凝结换热系数计算式〔1〕〔3〕

符号 r——汽化潜热，J/kg；λ_L——液体导热系数，W/（m·K）；
μ_L——液体动力粘度，kg/（m·s）；H——竖壁高度，m；
t_s——饱和温度，℃；t_w——壁温，℃；
d——管子外径，m；d_i——管子内径，m；
$\dot{m}$——冷剂质量流量，kg/s；
G_V，G_L——假定蒸汽以及液体占据整个管道时的质量流速，kg/(m²·s)；
ε_n——垂直方向管束排数对α值影响的校正系数。

换热条件	计算公式
1．竖壁和竖管	$\alpha=1.13\left(\frac{g\rho_L^2 r\lambda_L^3}{\mu_L H\ (t_s-t_w)}\right)^{1/4}$
2．水平圆管	$\alpha=0.72\left(\frac{g\rho_L^2 r\lambda_L^3}{\mu_L d\ (t_s-t_w)}\right)^{1/4}$
3．水平圆管束顺排和错排	$\alpha=\varepsilon_n\times0.72\left(\frac{g\rho_L^2 r\lambda_L^3}{\mu_L d\ (t_s-t_w)}\right)^{1/4}$

	排数	5	7	9	11	13	15	17	19	21
ε_n	顺排	0.67	0.62	0.58	0.55	0.52	0.50	0.49	0.48	0.47
	叉排	0.79	0.73	0.69	0.66	0.62	0.59	0.58	0.57	0.56

n排管束的平均放热系数

$\alpha=\varepsilon\alpha$

α为单管时的放热系数

1—错列　2—顺利

续上表

换 热 条 件	计 算 公 式
4．蒸汽在水平管内流动（考虑流速影响） 液膜 蒸汽	$\alpha=0.026\ \frac{\lambda_L}{d_i}\ Pr_L^{1/3}\cdot Re^{0.8}$ $Re=\frac{d_i}{\mu_L}\left[G_L+G_V\ \left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right)^{1/2}\right]$ （适用于$\frac{d_iG_V}{\mu_V}>20000,\ \frac{d_iG_L}{\mu_V}>5000$） 对氟利昂冷剂的简化公式〔7〕 对 $R12$　$\alpha=0.083\ \dot{m}^{0.75}\ d_i^{1.5}$ 对 $R22$　$\alpha=0.108\ \dot{m}^{0.75}\ d_i^{1.5}$

$$\alpha=3\,q^{0.7}\ p^{0.15}$$

或　$\alpha=38.7\ \Delta t^{2.33}p^{0.5}$　W/（m²·K）　　(1.1.5-30)

式中：p——沸腾时的蒸汽绝对压力，以 0.1 MPa 为单位，即以巴为单位代入公式；

q——热流密度 W/m²。

水管锅炉和制冷装置的管式蒸发器中的沸腾换热，由于空间的限制，沸腾产生的蒸汽和液体混合为二相流。二相流的沸腾换热系数与管子的放置位置、管长、直径，壁面状况、汽液比例、流速以及流体的物性有关。氟利昂冷剂在蒸发器管内的沸腾换热系数可用下列简化经验公式〔8〕。

对$R12$　$\alpha=1600\ W_0^{0.42}$　W/（m²·K）　　(1.1.5-31)

对$R22$　$\alpha=2470\ W_0^{0.47}$　W/（m²·K）　　(1.1.5-32)

式中：W_0——冷剂在蒸发器入口处的液体流速。

此式适用范围为 $W_0=0.1\sim0.5$ m/s；$q\leq4000$ W/m²。

3.6　轮机工程中常用的各种流体热物理性质表

在轮机工程中常用到的气体为空气和烟气，常遇到的液体为水、冷剂和各种油。在计算对流换热系数时，必须用到有关工质的热物理性质表。根据规定的定性温度去查得 ρ、C_p、λ、a、μ、ν、β 以及 P_r 数等值。本节列出有关工质的热物理性质表（见表1.1.5-13～1.1.5-20）。

表 1.1.5-13　　**大气压力下空气的热物理性质〔1〕**

t K	ρ kg/m³	c_p kJ/(kg·K)	$\mu\times10^7$ N·s/m²	$\nu\times10^6$ m²/s	$\lambda\times10^3$ W/(m·K)	$a\times10^6$ m²/s	P_r
100	3.5562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686

续上表

t K	ρ kg/m³	c_p kJ/(kg·K)	$\mu\times10^7$ N·s/m²	$\nu\times10^6$ m²/s	$\lambda\times10^3$ W/(m·K)	$a\times10^6$ m²/s	P_r
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.69
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.90	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.80	71.5	195	0.728
1200	0.2920	1.175	473.0	162.90	76.3	224	0.728

表 1.1.5-14　**烟气的热物理性质(大气压力下)** [1]

(烟气成分：$\gamma_{CO_2}=0.13$;$\gamma_{H_2O}=0.11$;$\gamma_{N_2}=0.76$)

t ℃	ρ kg/m³	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^6$ m²/s	$\mu\times10^3$ kg/(m·s)	$\nu\times10^6$ m²/s	P_r
0	1.295	1.042	2.28	16.9	15.8	12.20	0.72
100	0.950	1.068	3.13	30.8	20.4	21.54	0.69
200	0.748	1.097	4.01	48.9	24.5	32.80	0.67
300	0.617	1.122	4.84	69.9	28.2	45.81	0.65
400	0.525	1.151	5.70	94.3	31.7	60.38	0.64
500	0.457	1.185	6.56	121.1	34.8	76.30	0.63
600	0.405	1.214	7.42	150.9	37.9	93.61	0.62
700	0.363	1.239	8.27	183.8	40.7	112.1	0.61
800	0.330	1.264	9.15	219.7	43.4	131.8	0.60
900	0.301	1.290	10.00	258.0	45.9	152.5	0.59
1000	0.275	1.306	10.90	303.4	48.4	174.3	0.58
1100	0.257	1.323	11.75	345.5	50.7	197.1	0.57
1200	0.240	1.340	12.62	392.4	53.0	221.0	0.56

表 1.1.5-15　**饱和水的热物理性质** [1]

t ℃	$p\times10^{-5}$ Pa	ρ kg/m³	h' kJ/kg	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^8$ m²/s	$\mu\times10^6$ kg/(m·s)	$\nu\times10^6$ m²/s	$\beta\times10^4$ K⁻¹	$\sigma\times10^4$ N/m	P_r
0	1.013	999.9	0	4.212	55.1	13.1	1788	1.789	−0.63	756.4	13.67
10	1.013	999.7	42.04	4.191	57.4	13.7	1306	1.306	+0.70	741.6	9.52
20	1.013	998.2	83.91	4.183	59.9	14.3	1004	1.006	1.82	726.9	7.02
30	1.013	995.7	125.7	4.174	61.8	14.9	801.5	0.805	3.21	712.2	5.42
40	1.013	992.2	167.5	4.174	63.5	15.3	653.3	0.659	3.87	696.5	4.31
50	1.013	988.1	209.3	4.174	64.8	15.7	549.4	0.556	4.49	676.9	3.54
60	1.013	983.2	251.1	4.179	65.9	16.0	469.9	0.478	5.11	662.2	2.98

续上表

t ℃	$p\times10^{-5}$ Pa	ρ kg/m³	h' kJ/kg	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^8$ m²/s	$\mu\times10^6$ kg/(m·s)	$\nu\times10^6$ m²/s	$\beta\times10^4$ K⁻¹	$\sigma\times10^4$ N/m	P_r
70	1.013	977.8	293.0	4.187	66.8	16.3	406.1	0.415	5.70	643.5	2.55
80	1.013	971.8	335.0	4.195	67.4	16.6	355.1	0.365	6.32	625.9	2.21
90	1.013	965.3	377.0	4.208	68.0	16.8	314.9	0.325	6.95	607.2	1.95
100	1.013	958.4	419.1	4.220	68.3	16.9	282.5	0.295	7.52	588.6	1.75
110	1.43	951.0	461.4	4.233	68.5	17.0	259.0	0.272	8.08	569.0	1.60
120	1.98	943.1	503.7	4.250	68.6	17.1	237.4	0.252	8.64	548.4	1.47
130	2.70	934.8	546.4	4.266	68.6	17.2	217.8	0.233	9.19	528.8	1.36
140	3.61	926.1	589.1	4.287	68.5	17.2	201.1	0.217	9.72	507.2	1.26
150	4.76	917.0	632.2	4.313	68.4	17.3	186.4	0.203	10.3	486.6	1.17
160	6.18	907.4	675.4	4.346	68.3	17.3	173.6	0.191	10.7	466.0	1.10
170	7.92	897.3	719.3	4.380	67.9	17.3	162.8	0.181	11.3	443.4	1.05
180	10.03	886.9	763.3	4.417	67.4	17.2	153.0	0.173	11.9	422.8	1.00
190	12.55	876.0	807.8	4.459	67.0	17.1	144.2	0.165	12.6	400.2	0.96
200	15.55	863.0	852.5	4.505	66.3	17.0	136.4	0.158	13.3	376.7	0.93
210	19.08	852.3	897.7	4.555	65.5	16.9	130.5	0.153	14.1	354.1	0.91
220	23.20	840.3	943.7	4.614	64.5	16.6	124.6	0.148	14.8	331.6	0.89
230	27.98	827.3	990.2	4.681	63.7	16.4	119.7	0.145	15.9	310.0	0.88
240	33.48	813.6	1037.5	4.756	62.8	16.2	114.8	0.141	16.8	285.5	0.87
250	39.78	799.0	1085.7	4.844	61.8	15.9	109.9	0.137	18.1	261.9	0.86
260	46.94	784.0	1135.1	4.949	60.5	15.6	105.9	0.135	19.7	237.4	0.87
270	55.05	767.9	1185.3	5.070	59.0	15.1	102.0	0.133	21.6	214.8	0.88
280	64.19	750.7	1236.8	5.230	57.4	14.6	98.1	0.131	23.7	191.3	0.90
290	74.45	732.3	1290.0	5.485	55.8	13.9	94.2	0.129	26.2	168.7	0.93
300	85.92	712.5	1344.9	5.736	54.0	13.2	91.2	0.128	29.2	144.2	0.97
310	98.70	691.1	1402.2	6.071	52.3	12.5	88.3	0.128	32.9	120.7	1.03
320	112.90	667.1	1462.1	6.574	50.6	11.5	85.3	0.128	38.2	98.10	1.11
330	128.65	640.2	1526.2	7.244	48.4	10.4	81.4	0.127	43.3	76.71	1.22
340	146.08	610.1	1594.8	8.165	45.7	9.17	77.5	0.127	53.4	56.70	1.39
350	165.37	574.4	1671.4	9.504	43.0	7.88	72.6	0.126	66.8	38.16	1.60
360	186.74	528.0	1761.5	13.984	39.5	5.36	66.7	0.126	109	20.21	2.35
370	210.53	450.5	1892.5	40.321	33.7	1.86	56.9	0.126	264	4.709	6.79

表 1.1.5-16 **干饱和水蒸气的热物理性质 [1]**

t ℃	$P\times10^{-5}$ Pa	ρ'' kg/m³	h'' kJ/kg	r kJ/kg	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^3$ m²/h	$\mu\times10^6$ kg/(m·s)	$\nu\times10^6$ m²/s	P_r
0	0.00611	0.004847	2501.6	2501.6	1.8543	1.83	7313.0	8.022	1655.01	0.815
10	0.012270	0.009396	2520.0	2477.7	1.8594	1.88	3881.3	8.424	896.54	0.831
20	0.02338	0.01729	2538.0	2454.3	1.8661	1.94	2167.2	8.84	509.90	0.847
30	0.04241	0.03037	2556.5	2430.9	1.8744	2.00	1265.1	9.218	303.53	0.863
40	0.07375	0.05116	2574.6	2407.0	1.8853	2.06	768.45	9.620	188.04	0.883
50	0.12335	0.08302	2592.0	2382.7	1.8987	2.12	483.59	10.022	120.72	0.896
60	0.19920	0.1302	2609.6	2358.4	1.9155	2.19	315.55	10.424	80.07	0.913
70	0.3116	0.1982	2626.8	2334.1	1.9364	2.25	210.57	10.817	54.57	0.930
80	0.4736	0.2933	2643.5	2309.0	1.9615	2.33	145.53	11.219	38.25	0.947
90	0.7011	0.4235	2660.3	2283.1	1.9921	2.40	102.22	11.621	27.44	0.966

t ℃	$P\times10^{-5}$ Pa	ρ'' kg/m³	h'' kJ/kg	r kJ/kg	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^3$ m²/h	$\mu\times10^6$ kg/(m·s)	$\nu\times10^6$ m²/s	P_r
100	1.0130	0.5977	2676.2	2257.1	2.0281	2.48	73.57	12.023	20.12	0.984
110	1.4327	0.8265	2691.3	2229.9	2.0704	2.56	53.83	12.425	15.03	1.00
120	1.9854	1.122	2705.9	2202.3	2.1198	2.65	40.15	12.798	11.41	1.02
130	2.7013	1.497	2719.7	2173.8	2.1763	2.76	30.46	13.170	8.80	1.04
140	3.614	1.967	2733.1	2144.1	2.2408	2.85	23.28	13.543	6.89	1.06
150	4.760	2.548	2745.3	2113.1	2.3142	2.97	18.10	13.896	5.45	1.08
160	6.181	3.260	2756.6	2081.3	2.3974	3.08	14.20	14.249	4.37	1.11
170	7.920	4.123	2767.1	2047.8	2.4911	3.21	11.25	14.612	3.54	1.13
180	10.027	5.160	2776.3	2013.0	2.5958	3.36	9.03	14.965	2.90	1.15
190	12.551	6.397	2784.2	1976.6	2.7126	3.51	7.29	15.298	2.39	1.18
200	15.549	7.864	2790.9	1938.5	2.8428	3.68	5.92	15.651	1.99	1.21
210	19.077	9.593	2796.4	1898.3	2.9877	3.87	4.86	15.995	1.67	1.24
220	23.198	11.62	2799.7	1856.4	3.1497	4.07	4.00	16.338	1.41	1.26
230	27.976	14.00	2801.8	1811.6	3.3310	4.30	3.32	16.701	1.19	1.29
240	33.478	16.76	2802.2	1764.7	3.5366	4.54	2.76	17.073	1.02	1.33
250	39.776	19.99	2800.6	1714.5	3.7723	4.84	2.31	17.446	0.873	1.36
260	46.943	23.73	2796.4	1661.3	4.0470	5.18	1.94	17.848	0.752	1.40
270	55.058	28.10	2789.7	1604.8	4.3735	5.55	1.63	18.280	0.651	1.44
280	64.202	33.19	2780.5	1543.7	4.7675	6.00	1.37	18.750	0.565	1.49
290	74.461	39.16	2767.5	1477.5	5.2528	6.55	1.15	19.270	0.492	1.54
300	85.927	46.19	2751.1	1405.9	5.8632	7.22	0.96	19.839	0.430	1.61
310	98.700	54.54	2730.2	1327.6	6.6503	80.2	0.80	20.691	0.380	1.71
320	112.89	64.60	2703.8	1241.0	7.7217	8.65	0.62	21.691	0.336	1.94
330	128.63	76.99	2670.3	1143.8	9.3613	9.61	0.48	23.093	0.300	2.24
340	146.05	92.76	2626.0	1030.8	12.2108	10.70	0.34	24.692	0.266	2.82
350	165.35	113.6	2567.8	895.6	17.1504	11.90	0.22	26.594	0.234	3.83
360	186.75	144.1	2485.3	721.4	25.1162	13.70	0.14	29.193	0.203	5.34
370	210.54	201.1	2342.9	452.6	81.1025	16.60	0.04	33.989	0.169	15.7
374.15	221.20	315.5	2107.2	0.0	∞	23.80	0.0	44.992	0.143	∞

表 1.1.5-17　　**过热水蒸气的热物理性质(大气压力下)** [1]

T K	ρ kg/m³	C_p kJ/(kg·K)	$\mu\times10^5$ kg/(m·s)²	$\nu\times10^5$ m²/s	λ W/(m·K)	$a\times10^5$ m²/s	P_r
380	0.5863	2.060	1.271	2.16	0.0246	2.036	1.060
400	0.5542	2.014	1.344	2.42	0.0261	2.338	1.040
450	0.4902	1.980	1.525	3.11	0.0299	3.07	1.010
500	0.4405	1.985	1.704	3.86	0.0339	3.87	0.996
550	0.4005	1.997	1.884	4.70	0.0379	4.75	0.991
600	0.3852	2.026	2.067	5.66	0.0422	5.73	0.986
650	0.3380	2.056	2.247	6.64	0.0464	6.66	0.995
700	0.3140	2.085	2.426	7.72	0.0505	7.72	1.000
750	0.2931	2.119	2.604	8.88	0.0549	8.33	1.005
800	0.2730	2.152	2.786	10.20	0.0592	10.01	1.010
850	0.2579	2.186	2.969	11.52	0.0637	11.30	1.019

表 1.1.5-18　　　　常用油类的热物理性质 [1]

油类名称	温度 ℃	ρ kg/m³	C kJ/(kg·K)	λ W/(m·K)	$a\times10^7$ m²/s	$\nu\times10^6$ m²/s	P_r
汽油	0	900	1.80	0.145	0.897		
	50		1.842	0.137	0.667		
柴油	20	908.4	1.838	0.128	0.947	620	8000
	40	895.5	1.909	0.126	1.094	135	1840
	60	882.4	1.980	0.124	1.236	45	630
	80	870.0	2.052	0.123	1.367	20	290
	100	857.0	2.123	0.122	1.506	10.8	162
润滑油	0	899	1.796	0.148	0.894	4280	47100
	40	876	1.955	0.144	0.861	242	2870
	80	852	2.131	0.138	0.806	37.5	490
	120	829	2.307	0.135	0.750	12.4	175
锭子油	20	871	1.851	0.144	0.894	15.0	168
	40	858	1.934	0.143	0.861	7.93	92.0
	80	832	2.102	0.141	0.806	3.40	42.1
	120	807	2.269	0.138	0.750	1.91	25.5
变压器油	20	866	1.892	0.124	0.758	36.5	481
	40	852	1.993	0.123	0.725	16.7	230
	60	842	2.093	0.122	0.692	8.7	126
	80	830	2.198	0.120	0.656	5.2	79.4
	100	818	2.294	0.119	0.633	3.8	60.3
30#透平油	10	905	1.80	0.129	0.794	340	4270
	20	899	1.834	0.129	0.781	162	2070
	30	893	1.871	0.128	0.767	83	1080
	40	886	1.905	0.127	0.756	49	648
	50	880	1.943	0.127	0.742	31	418
	60	873	1.976	0.126	0.731	20.5	281
	70	867	2.014	0.126	0.719	14.6	203
	80	861	2.047	0.124	0.706	10.7	151
	90	854	2.085	0.123	0.697	7.95	114
	100	848	2.119	0.123	0.686	6.0	87.4

表 1.1.5-19　　　　常用制冷剂饱和液的热物理性质 [1]

t ℃	$p\times10^{-5}$ Pa	ρ kg/m³	r kJ/kg	C_p kJ/(kg·K)	λ W/(m·K)	$a\times10^7$ m²/s	$\nu\times10^6$ m²/s	$\beta\times10^4$ K⁻¹	P_r
R−717(NH_3)									
−77.9	—	—	—	4.321	0.55	—	—	—	—
−70	0.1089	725.3	1464.5	4.338	0.55	1.75	0.653	15.6	3.73
−60	0.2187	713.8	1440.3	4.371	0.552	1.77	0.533	16.1	3.01
−50	0.4089	702.0	1414.3	4.409	0.552	1.79	0.461	16.9	2.58
−40	0.7178	690.0	1387.1	4.438	0.551	1.80	0.414	17.7	2.30
−30	1.1956	677.7	1358.6	4.467	0.549	1.81	0.376	18.3	2.07
−20	1.9023	665.0	1328.5	4.509	0.544	1.82	0.342	19.3	1.88
−10	2.9086	652.0	1296.2	4.551	0.537	1.81	0.316	20.2	1.74
0	4.2946	638.6	1262.3	4.597	0.524	1.79	0.293	21.2	1.64
10	6.1497	624.7	1225.9	4.647	0.509	1.75	0.270	22.5	1.54
20	8.5715	610.3	1187.4	4.710	0.494	1.72	0.249	23.9	1.45
30	11.6654	595.2	1145.5	4.798	0.474	1.66	0.23	25.7	1.38
40	15.5441	579.5	1100.3	4.899	0.455	1.61	0.216	27.9	1.34
50	20.3270	562.8	1052.1	5.020	0.433	1.53	0.202	30.3	1.32
60	26.1455	544.0	996.5	5.150	0.410	1.47	0.189	33.2	1.29
70	33.1182	524.8	940.4	5.317	—	-	0.176	36.8	--

续上表

t ℃	$p\times10^{-5}$ Pa	ρ kg/m³	r kJ/kg	C_p kJ/(kg·K)	λ W/(m·K)	$a\times10^{7}$ m²/s	$\nu\times10^{6}$ m²/s	$\beta\times10^{4}$ K⁻¹	P_r
R−717(NH_3)									
80	41.4444	504.2	874.2	5.531	—	—	0.163	42.3	—
90	51.2318	481.6	800.1	—	—	—	0.153	—	—
100	62.6373	456.3	715.5	6.20	—	—	0.140	—	—
132.4	—	242.0	—	—	—	—	0.109	—	—
R−744(CO_2)									
−50	6.8354	1156.34		1.84	0.0855	0.4021	0.119		2.96
−40	10.0522	1117.77		1.88	0.1011	0.4810	0.118		2.46
−30	14.2692	1076.76		1.97	0.1116	0.5272	0.117		2.22
−20	19.6728	1032.39		2.05	0.1151	0.5445	0.115		2.12
−10	26.4691	983.38		2.18	0.1099	0.5133	0.113		2.20
0	34.8541	926.99		2.47	0.1045	0.4578	0.108		2.38
10	45.0632	860.03		3.14	0.0971	0.3608	0.101		2.80
20	57.3317	772.57		5.0	0.0872	0.2219	0.091	140	4.10
30	71.9245	597.81		36.4	0.0703	0.2790	0.080		28.7
R−11 ($CFCl_3$)									
−40	0.051	1630	203.4	0.829	0.1325	0.978	0.602	13.0	6.17
−25	0.1211	1590	198.5	0.837	0.1267	0.953	0.47	13.3	4.96
0	0.402	1540	190.4	0.846	0.1163	0.90	0.345	14.4	3.82
20	0.8866	1490	183.5	0.858	0.1093	0.861	0.29	15.7	3.35
50	2.3566	1410	171.8	0.90	0.0977	0.769	0.245	18.6	3.18
R−12(CF_2Cl_2)									
−40	0.6424	1517	170.9	0.8834	0.10	0.747	0.28	19.76	3.79
−30	1.0047	1487	167.3	0.8960	0.0953	0.717	0.254	20.86	3.55
−20	1.5069	1456	163.5	0.9085	0.0910	0.686	0.236	21.90	3.44
−10	2.1911	1425	159.4	0.9211	0.0860	0.656	0.220	20.0	3.36
0	3.0858	1394	154.9	0.9337	0.0814	0.625	0.211	23.75	3.38
30	7.4347	1293	138.6	0.9339	0.0674	0.531	0.194	27.2	3.66
60	15.1822	1167	116.9	1.1179	0.0535	0.411	0.184	37.70	4.49
R−22 (CHF_2Cl)									
−70	0.2048	1489	250.6	0.9504	0.1244	0.873	0.434	15.69	3.94
−60	0.3746	1465	245.1	0.9839	0.1198	0.833	0.323	16.91	3.88
−50	0.6473	1439	239.5	1.0174	0.1163	0.794	0.275	19.50	3.46
−40	1.0552	1411	233.8	1.0467	0.1116	0.753	0.249	19.84	3.31
−30	1.6466	1382	227.6	1.0802	0.1081	0.722	0.232	20.82	3.20
−20	2.4616	1350	220.9	1.1137	0.1035	0.689	0.218	23.74	3.17
−10	3.5599	1318	214.4	1.1472	0.10	0.661	0.210	24.52	3.18
0	5.0016	1285	207.0	1.1807	0.0953	0.628	0.204	29.72	3.25
10	6.8551	1249	198.3	1.2142	0.0907	0.608	0.199	29.53	3.32
20	9.1695	1213	188.4	1.2477	0.0872	0.578	0.197	30.51	3.41
30	12.0233	1176	177.3	1.2770	0.0826	0.550	0.196	33.70	3.55
40	15.4852	1132	164.8	1.3105	0.0791	0.531	0.196	39.95	3.67
50	19.6434	1084	155.3	1.3440	0.0744	0.511	0.196	45.50	3.78
60		1032	141.9	1.3733	0.0709	0.50	0.202	54.60	3.92
70		969	125.6	1.4068	0.0733	0.492	0.208	68.83	4.11
80		895	104.7	1.4403	0.0628	0.466	0.219	95.71	4.41

表 1.1.5-20　　常用制冷剂饱和蒸气的热物理性质[1]

t ℃	$p\times10^{-5}$ Pa	ρ kg/m³	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^5$ m²/s	$\nu\times10^6$ m²/s	P_r
			R−717(NH_3)				
−70	0.1089	0.121	—	1.512	—	63.12	—
−60	0.2187	0.213	2.135	1.593	3.511	34.46	0.98
−50	0.4089	0.381	2.177	1.674	1.992	20.07	1.01
−40	0.7178	0.645	2.261	1.756	1.20	12.41	1.04
−30	1.1956	1.038	2.386	1.756	0.753	8.04	1.07
−20	1.9023	1.604	2.470	1.965	0.494	5.42	1.10
−10	2.9086	2.390	2.596	2.070	0.333	3.81	1.14
0	4.2946	3.452	2.721	2.209	0.236	2.77	1.18
10	6.1497	4.859	2.889	2.372	0.169	2.04	1.21
20	8.5715	6.694	3.056	2.546	0.125	1.56	1.25
30	11.6654	9.034	3.308	2.744	0.092	1.28	1.34
40	15.5441	12.005	3.559	2.988	0.069	0.98	1.40
50	20.3270	15.75	3.852	2.349	0.056	0.83	1.50
			R−11($CFCl_3$)				
−40	0.051	0.364	0.519	0.6976	3.694	24.3	0.66
−30	0.0922	0.65	0.519	0.7092	2.111	14.0	0.66
−20	0.1569	1.04	0.536	0.7325	1.317	9.20	0.7
−10	0.2560	1.63	0.536	0.7558	0.861	6.03	0.7
0	0.4021	2.47	0.536	0.7790	0.589	4.1	0.7
10	0.6056	3.61	0.544	0.8139	0.417	2.88	0.7
20	0.8866	5.16	0.557	0.8255	0.286	2.1	0.73
30	1.2607	7.14	0.574	0.8488	0.206	1.55	0.76
50	2.3566	13.0	0.582	0.8953	8.118	0.90	0.77
			R−12 (CF_2Cl_2)				
−80	0.0628	0.471	0.456	0.558	2.297	20.80	0.80
−70	0.1236	0.888	0.469	0.593	1.425	11.50	0.81
−60	0.2275	1.564	0.486	0.628	0.828	6.65	0.80
−50	0.3923	2.595	0.498	0.663	0.514	4.12	0.80
−40	0.6424	4.097	0.519	0.698	0.328	2.66	0.81
−30	1.0047	6.20	0.536	0.733	0.219	1.80	0.82
−20	1.5069	9.034	0.557	0.779	0.155	1.27	0.82
−10	2.1911	12.80	0.582	0.837	0.112	0.92	0.82
0	3.0858	17.65	0.603	0.895	0.084	0.69	0.82
10	4.2302	23.79	0.636	0.977	0.064	0.53	0.82
20	5.6673	31.50	0.670	1.070	0.051	0.42	0.83
30	7.4347	41.11	0.712	1.174	0.040	0.34	0.84
40	9.5821	53.13	0.741	1.267	0.032	0.27	0.85
50	12.1470	68.56	0.787	1.384	0.026	0.22	0.86
60	15.1822	85.69	0.85	1.535	0.021	0.19	0.89
			R−22(CHF_2Cl)				
−100	0.0206	0.12	0.502	0.698	11.63	63.8	0.55
−80	0.103	0.563	0.519	0.791	2.69	15.3	0.57
−60	0.3746	1.869	0.54	0.849	0.84	5.14	0.61
−50	0.6473	3.096	0.553	0.884	0.51	3.23	0.63
−40	1.0552	4.878	0.569	0.93	0.33	2.15	0.64
−30	1.6466	7.407	0.586	0.965	0.22	1.47	0.66
−20	2.4616	10.76	0.603	1.0	0.15	1.04	0.66
−10	3.56	15.29	0.620	1.035	0.11	0.763	0.67
0	5.0016	21.23	0.641	1.070	0.08	0.563	0.70
10	6.8551	28.90	0.670	1.105	0.06	0.424	0.72
20	9.1695	38.76	0.708	1.139	0.04	0.329	0.75

续上表

t ℃	$p\times10^{-5}$ Pa	ρ kg/m³	C_p kJ/(kg·K)	$\lambda\times10^2$ W/(m·K)	$a\times10^5$ m²/s	$\nu\times10^6$ m²/s	P_r
			R−22(CHF_2Cl)				
30	12.0234	51.55	0.754	1.174	0.03	0.253	0.84
40	15.4853	67.57	0.804	1.209	0.02	0.199	0.90
50	19.6434	88.5	0.858	—	—	—	—
60	—	111.5	—	1.279	—	0.125	—

例：某蒸汽锅炉工作压力 $P=1\,MPa$，其蒸发排管为叉排管6排，管子外径 $d=38$ mm，管束前的燃气温度 $t_1=700℃$，管束后燃气温度 $t_2=500℃$，燃气在管间的流速 $W=15$ m/s，管束的管距比 $s_1/s_2=1$。求燃气对管束的平均换热系数值。

解：查表1.1.5-10得知可以用下式求 α 值：

$$Nu_f=0.35\,Re_f^{0.6}\cdot Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}\cdot\varepsilon_n$$

按燃气平均温度 $t_f=(500+700)\ 0.5=600℃$，查表1.1.5—12得知：

$\lambda_f=7.42\times10^{-2}W/(m\cdot K)$；$\nu_f=93.61\times10^{-6}m^2/s$；

$Pr_f=0.62$。

管壁温度 t_w 接近于管内沸水温度，按蒸汽锅炉压力查饱和蒸汽表可得。$P=1\,MPa$，得 $t_s=180℃$。按 $t_W=180℃$，查得 $P_rr_W=0.674$

6排错列管束的 ε_n值为0.95。按公式得

$$\alpha=\frac{0.0742}{0.038}\times0.035\left(\frac{15\times0.038}{93.61\times10^{-6}}\right)^{0.6}\times0.62^{0.36}\times\left(\frac{0.62}{0.674}\right)^{0.25}\times0.95$$

$$=0.683\ (6089)^{0.6}\times0.841\times0.979\times0.95$$

$$=99.7\,W/(m^2\cdot K)$$

例：某$R12$制冷装置的冷凝器传热面积 $F=18\,m^2$，水平放置的冷凝管外径 $d=13$ mm，冷凝压力所对应的饱和温度 $t_s=35℃$，管壁温度 $t_w=25℃$，求凝结换热系数 α和该冷凝器的换热量 Q 值。

解：冷剂 $R12$液体在管壁上的液膜平均温度 t_m为

$$t_m=(t_s+t_w)/2=(35+25)/2=30℃;$$

由表1.1.5-19可查得30℃时的下列物性参数：

$\rho=1293\,kg/m^3$；$\lambda=0.0674\,W/(m\cdot k)$；

$\nu=0.194\times10^{-6}m^2/s$；$r=133.6\,kJ/kg=133,600\,J/kg$。

按公式(表1.1.5-12之2)求 α 值，公式中 r应按 $t_s=35℃$查表，由于表中只有30℃，则近似地按 30℃的r值代入式中，得

$$\alpha=0.72\left(\frac{1293\times133600\times0.0674^3\times9.81}{0.194\times10^{-6}\times0.013\ (35-25)}\right)^{0.25}$$

$$=0.72\times2129.74=1,533\,W/(m^2\cdot K)$$

$$Q=\alpha F(t_s-t_w)=1533\times18\times10=276,014\,W$$

3.7 增强对流换热的几种措施

固体壁面对流体的对流换热强度取决于流体热边界层的导热热阻。设法减小热边界层的

厚度和采用导热系数较大的流体，就能有效地增强对流换热。

1）采用导热系数较大的流体

氢气的导热系数比空气大 7 倍，水的导热系数比空气大 25 倍，因此大功率的发电机为了强化换热采用氢气冷却。采用水冷却的大功率发电机，其冷却效果更好。水冷却的滑油冷却器尺寸远比风冷式的尺寸要小得多就是这个道理。

2）使换热面上的热边界变薄

采用加大流速，用短管或平肋片上布置切断的凸边，都可使热边界层变薄，增大平均放热系数。有一种新型的造水蒸发器，制成波形的换热面有利于凝结液下落使热边界层变薄，强化凝结传热。

3）增加流体的扰动来减薄热边界层

增加流速，应用扰流器，采用螺旋管或螺旋板式换热器以增大换热系数；在肋片上轧制凸起点、波纹、小孔，以增大扰动，达到强化对流换热的效果。

4 辐射换热

辐射换热是不依赖任何介质在两物体间可进行热交换的过程。它可以在真空中借电磁波来传递能量。在轮机工程中常用的温度范围内，辐射能大多属于红外线辐射。由于太阳表面温度高达 6000℃，所以太阳日照的辐射能中有将近一半是属于可见光谱的范围。

4.1 热辐射的基本概念

只要物体的温度高于绝对零度，它便不断地以电磁波的形式向外发射辐射能。同时，也吸收周围物体给它的辐射能。这种能量收支的总计便是辐射换热量。人们把电磁波中0.4～1000 μm 这一波长范围的电磁波称为热射线，其中包括 0.4～0.7 μm 的可见光线，0.7～25 μm 的近红外线和 25～1000μm的远红外线。远红外辐射在近十几年中才被利用于材料的加热烘干工艺流程中，它是一种能耗小、效果好的烘干工艺。

4.1.1 绝对黑体与灰体

吸收率 A 为 1 的物体称绝体黑体，其反射率 R 与穿透率 D 皆为零。绝体黑体简称黑体，它能把投射来的辐射能全部吸收。

灰体对于投射来的各种波长辐射皆吸收相等的百分数。

4.1.2 辐射力

单位时间内单位面积向半球空间发射的一切波长的总能量，称为辐射力 E（W/m²）。绝对黑体的辐射力 E_b 由斯蒂芬——波尔兹曼定律得出，即

$$E_b=\sigma_b T^4=C_0(T/100)^4 \quad \mathrm{W/m^2} \tag{1.1.5-33}$$

式中：σ_b——黑体辐射常数，$\sigma_b=5.67\times10^{-8}\mathrm{W/(m^2\cdot K)^4}$；

C_0——黑体辐射系数，$C_0=5.67\ \mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$；

T——物体的绝对温度。

工程上的物体皆非黑体，可看做灰体，其辐射力 E 为

$$E=\varepsilon E_b=\varepsilon\sigma_b T^4=\varepsilon C_0(\mathrm{T}/100)^4\mathrm{W/m^2} \tag{1.1.5-34}$$

式中，ε为黑度，它表示物体辐射力接近黑体辐射力的程度。它与物体表面的温度及粗糙度等因素有关。黑体的黑度为 1，灰体的黑度必小于 1。

4.1.3 基尔霍夫定律

任何物体的辐射力与吸收率A之比值等于同温度下黑体的辐射力，而与物体性质无关，即

$$\frac{E}{A}=E_b \qquad (1.1.5\text{-}35)$$

式（1.1.5-29）与式（1.1.5-30）相比得

$$\varepsilon=A$$

即在热平衡条件下，任意物体的 A 等于ε。表 1.1.5-21 为各种材料表面的黑度 ε值。

表 1.1.5-21　　各种材料表面的黑度 ε［3］

材料名称及表面状况	温度℃	ε	材料名称及表面状况	温度℃	ε
铝：抛光的，纯度 98%	200～600	0.04～0.06	石棉水泥	40	0.96
工业用铝板	100	0.09	石 棉 瓦	40	0.97
严重氧化的	100～500	0.2～0.33	砖：粗糙红砖	40	0.93
黄铜：高度抛光的	260	0.03	耐火粘土砖	980	0.75
无光泽的	40～260	0.22	碳：灯黑	40	0.95
氧 化 的	40～260	0.46～0.56	石灰砂浆：白色，粗糙	40～260	0.87～0.92
铬：抛光板	40～550	0.08～0.27	粘土：耐火粘土	100	0.91
铜：高度抛光的电解铜	100	0.02	土壤(干)	20	0.92
轻微抛光的	40	0.12	土壤(湿)	20	0.95
氧化变黑的	40	0.76	混凝土：粗糙表面	40	0.94
金：高度抛光的纯金	100～600	0.02～0.035	玻璃：平板玻璃	40	0.94
钢铁：钢，抛光的	40～260	0.07～0.1	瓷：上釉的	40	0.93
钢板，轧制的	40	0.65	石膏：	40	0.80～0.90
钢板，粗糙，氧化严重的	40	0.80	大理石：浅灰，磨光的	40	0.93
铸铁，抛光的	200	0.21	油漆：各种油漆	40	0.92～0.96
铸铁，新车削的	40	0.44	白色喷漆	40	0.80～0.95
铸铁，氧化的	40～260	0.57～0.66	光亮黑漆	40	0.90
不锈钢，抛光的	40	0.07～0.17	纸：白纸	40	0.95
银：抛光的或蒸镀的	40～540	0.01～0.03	粗糙屋面焦油纸毡	40	0.90
锡：光亮的镀锡铁皮	40	0.04～0.06	橡胶：硬质的	40	0.94
锌：镀锌，灰色	40	0.28	雪	−12～−7	0.82
木材：各种木材	40	0.80～0.90	水：厚度 0.1 mm以上	40	0.96
石棉：板	40	0.96	人体皮肤	32	0.98

4.1.4 单色辐射力

物体的辐射能量是按波长分布的。单位时间内单位面积向半球空间发射的某一特定波长的能量称为单色辐射力 E_λ。单色辐射力和辐射力之间的关系为

$$E=\int_0^\infty E_\lambda d\lambda \qquad \text{W/m}^2 \qquad (1.1.5\text{-}36)$$

黑体的单色辐射力 $E_{b\lambda}$ 与波长的关系为普朗克定律所决定，其数学表达式为

$$E_{b\lambda}=\frac{C_1\lambda^{-5}}{exp(C_2/\lambda T)-1}\text{W/ (m}^2\cdot\mu\text{m)} \qquad (1.1.5\text{-}37)$$

式中：C_1——第一常数，$C_1=3.74\times10^8\text{W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$；

C_2——第二常数，$C_2=1.438\times10^4\mu\text{m}\cdot\text{K}$；

λ——波长，μm。

对应于黑体的最大单色辐射力的波长 λ_{max}与温度 T 之间的关系为

$$\lambda_{max}T=2898\ \mu\text{m}\cdot\text{K} \qquad (1.1.5\text{-}38)$$

式（1.1.5-32）称为维恩位移定律。它表明温度愈高的物体其辐射能量中最大单色辐射力的波长向短波方向移动。

4.1.5 有效辐射

因为灰体表面只吸收投射到该表面辐射的一部分，其余部分则反射回去，所以在灰体表

面之间形成多次反射以及吸收的现象，使得灰体表面间的辐射换热比黑体间的辐射要复杂。人们用辐射探测仪测得的灰体辐射是该灰体本身辐射 $\varepsilon_1 E_{b1}$和反射辐射$E_z(1-A_1)$之和，即

$$J_1=\varepsilon_1 E_{b1}+(1-A_1)\ E_z \quad \mathrm{W/m^2} \qquad (1.1.5\text{-}39)$$

式中，J_1 称为有效辐射，E_z为外界投射到表面 1 的投射辐射，ε_1 为表面 1 的黑度，A_1为表面 1 的吸收率。图 1.1.5-15 表示灰体表面 1 的有效辐射示意图。

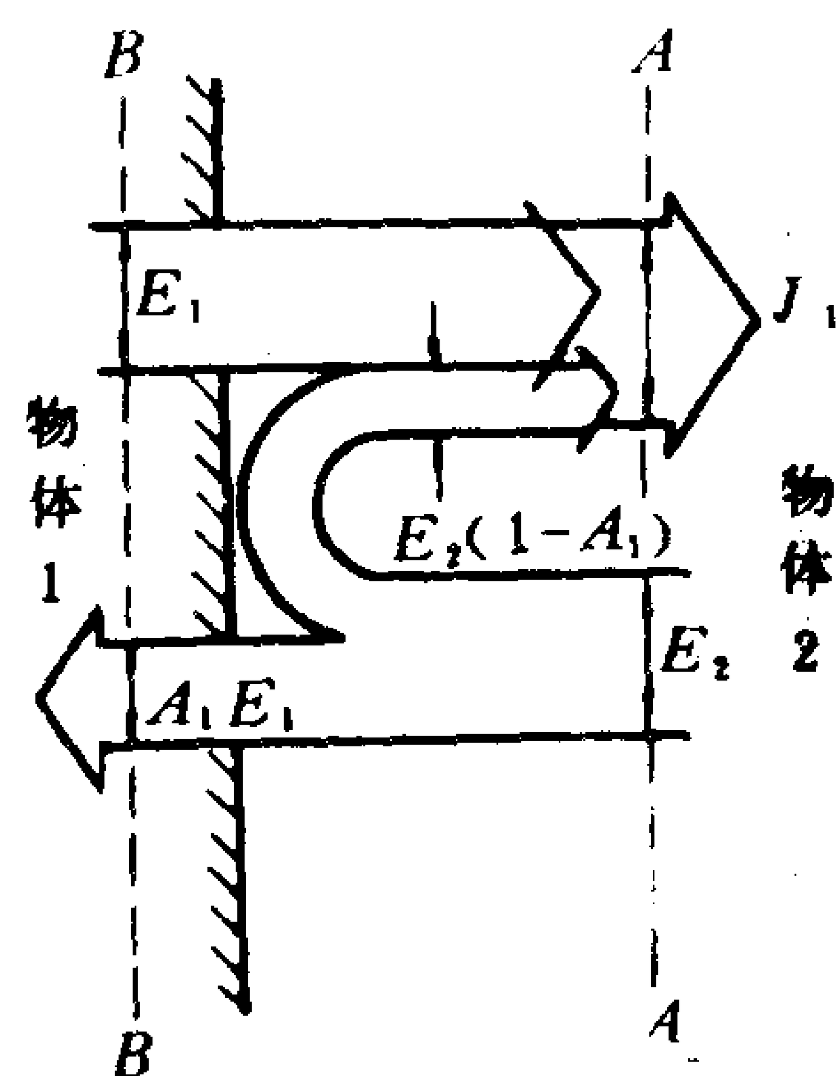


图 1.1.5-15 有效辐射示意图

4.2 辐射换热计算公式

由图 1.1.5-15 的 A-A 断面处可导出灰体 1 每单位表面积的辐射换热量 Q_1/F_1 值为

$$Q_1/F_1=J_1-G_1 \quad \mathrm{W/m^2} \qquad (1.1.5\text{-}40)$$

将式（1.1.5-40）移项可得

$$G_1=(J_1-\varepsilon_1 E_{b1})/(1-A_1) \quad \mathrm{W/m^2} \qquad (1.1.5\text{-}41)$$

对于灰体表面，$A_1=\varepsilon_1$，将式（1.1.5-40）与（1.1.5-41）合并可导得

$$Q_1=\frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_1}F_1\ (E_{b1}-J_1)=\frac{E_{b1}-J_1}{(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 F_1} \quad \mathrm{W} \qquad (1.1.5\text{-}42)$$

式（1.1.5-36）给出了灰体表面辐射换热电网络模拟的基本公式。Q_1 模拟电流、$(E_{b1}-J_1)$模拟电位差、$(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 F_1$ 模拟电阻，其网络图由图 1.1.5-16 所示。对于黑体，其有效辐射 J_1 应等于黑体的辐射力。用网络图也可看出，当 $\varepsilon_1=1$ 时，表面热阻$(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 F_1$ 为零，则J_1 等于 E_{b1}。

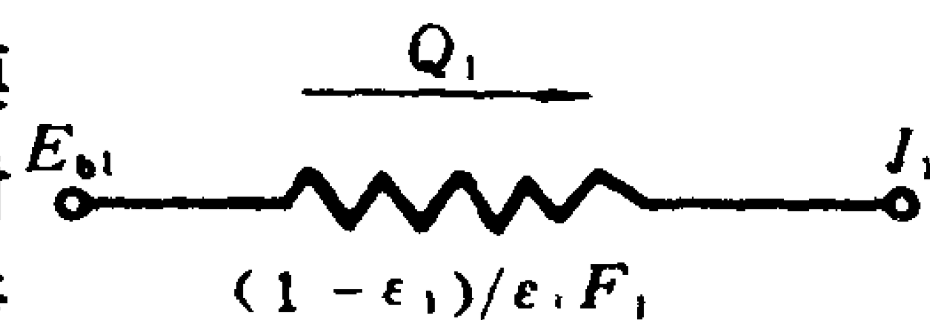


图 1.1.5-16

辐射换热的表面热阻电网络图

4.2.1 辐射换热的角系数与空间热阻

图 1.1.5-17 为任意放置两灰体表面间的辐射换热示意图。灰体 1 辐射出的能量只有 $\varphi_{1,2}$ 部分投射到灰体 2 上，同样，灰体 2 辐射出的能量也只有 $\varphi_{2,1}$ 部分能投射到灰体 1 上。φ_{12}和$\varphi_{2,1}$称角系数，它与两物体的形状、位置与辐射面积的大小等几何系数有关。按有效辐射与角系数的定义可列出两灰体表面间辐射换热的计算式为

$$Q_{1,2}=J_1F_1\varphi_{1,2}-J_2F_2\varphi_{21} \qquad (1.1.5\text{-}43)$$

若 1，2 两物体表面温度相同，又都是黑体，则两物体的辐射换热量 $Q_{1,2}=0$，有效辐射 $J_1=J_2$，按（1.1.5-43）可得

$$F_1\varphi_{12}=F_2\varphi_{2,1} \qquad (1.1.5\text{-}44)$$

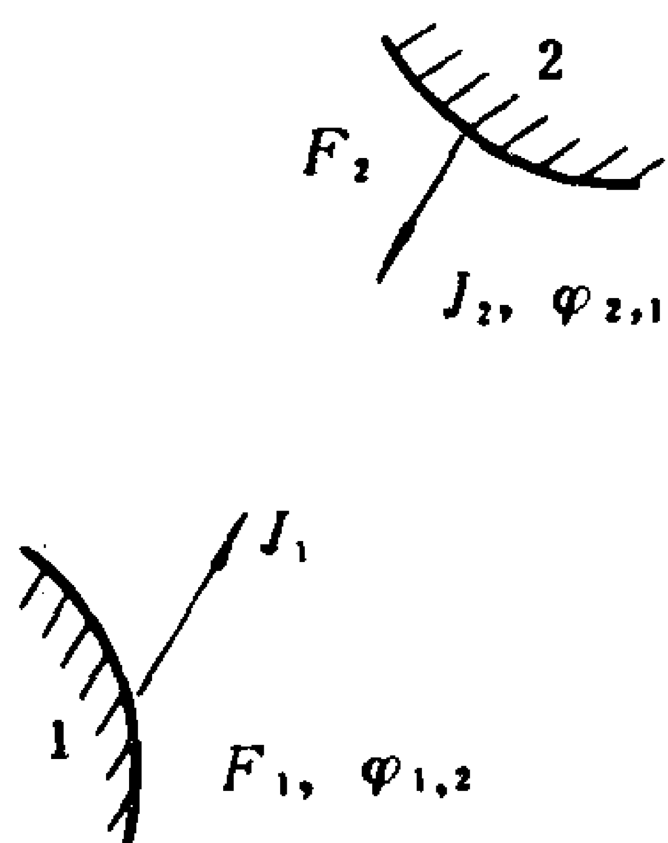


图 1.1.5-17 任意放置的两灰体表面辐射换热示意图

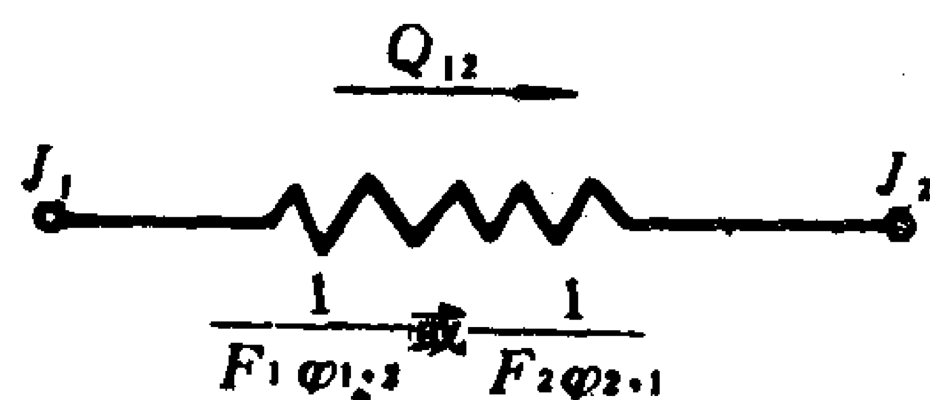


图 1.1.5-18

辐射换热的空间热阻电网络图

式（1.1.5-44）为两表面辐射换热的互换性原理，此原理虽由等温的两黑体辐射换热引出，但由于 F_1、F_2、$\phi_{1,2}$及$\varphi_{2,1}$皆为几何参数，因此可推广应用于不等温的二灰体辐射换热。将式（1.1.5-44）代入式（1.1.5-43）得

$$Q_{12}=\frac{J_1-J_2}{1/(F_2\varphi_{2,1})}$$

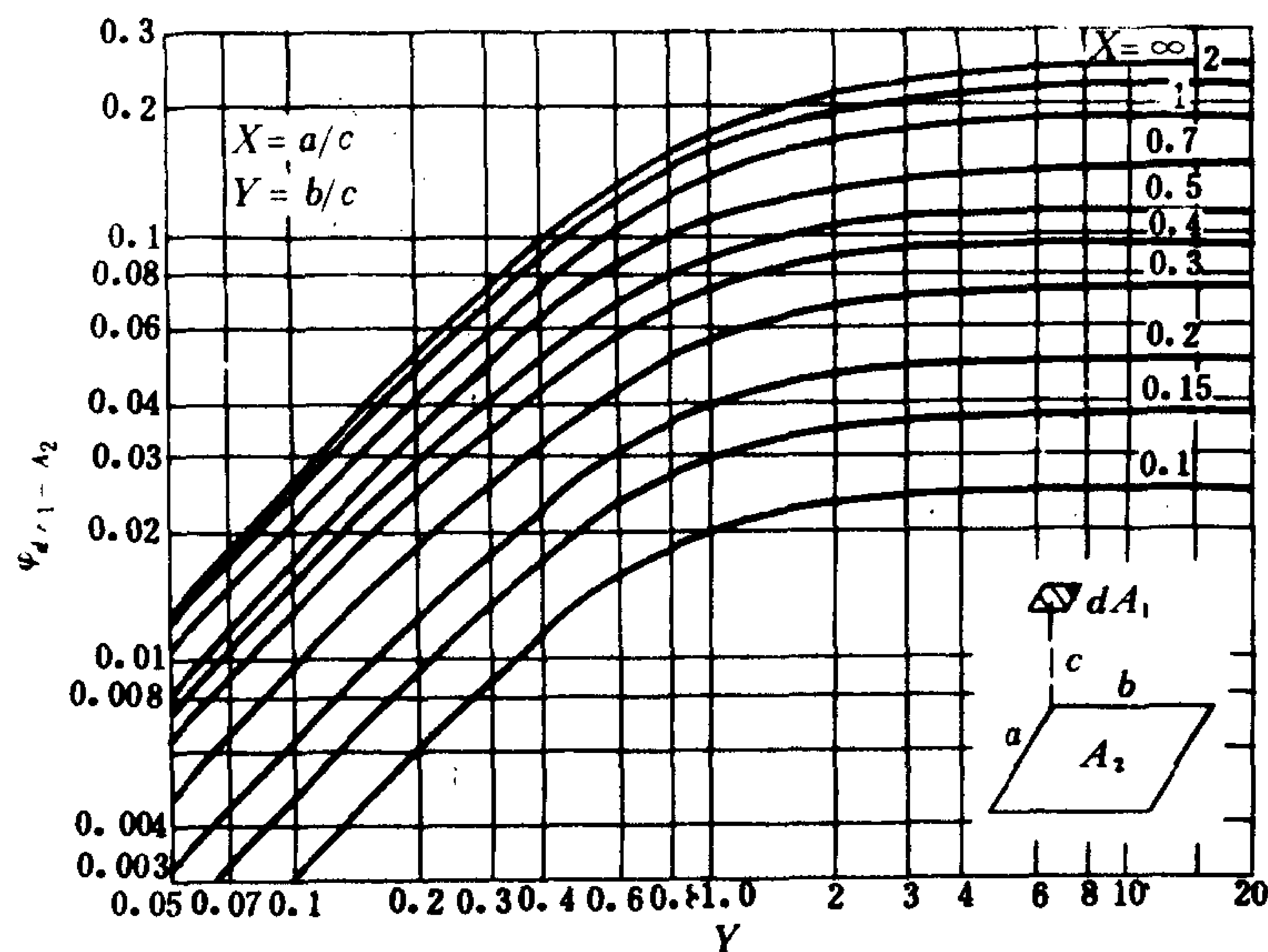


图 1.1.5-19　dA_1与A_2的求角系数线图（dA_1平行于A_2）

$$=\frac{J_1-J_2}{1/(F_2\varphi_{2,1})} \quad (1.1.5\text{-}45)$$

按辐射电网络模拟原理可认为$1/(F_1\varphi_{1,2})$是J_1和J_2之间的"空间热阻"。图 1.1.5-18 所示为两灰体进行换热的空间热阻电网络图。空间热阻中的角系数值，按两物体的大小和相对位置查相应的线图可得。

图 1.1.5-19 为微小面积dA_1与矩形面A_2平行，并且dA_1的中心法线垂直矩形面的某一顶角时的求角系数线图。

图 1.1.5-20 为dA_1垂直于A_2的某一顶角时，求角系数的线图。

图 1.1.5-21 为两平行矩形A_1与A_2间的求角系数线图。

图 1.1.5-22 为两块相互垂直的矩形面间的求角系数线图。

除了应用线图计算角系数以外，表 1.1.5-22 列出几种常用的辐射换热表面间求角系数的计算公式。

表 1.1.5-22　**角系数计算公式**

换 热 表 面	角系数的计算公式
1．两块平行的平面，其尺寸远大于二者距离 1 2	$\varphi_{1,2}=\varphi_{2,1}=1$
2．两块平行的平面，其尺寸a_1，a_2与距离h在同一数量级（垂直于纸面的尺寸远大于h） 1　2 a_1　h　a_2	$\varphi_{1,2}=\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{a_2}{a_1}+1\right)^2+\left(\frac{h}{a_1}\right)^2}-\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{a_2}{a_1}-1\right)^2+\left(\frac{h}{a_1}\right)^2}$ $\varphi_{2,1}=\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{a_1}{a_2}+1\right)^2+\left(\frac{h}{a_2}\right)^2}-\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{a_1}{a_2}-1\right)^2+\left(\frac{h}{a_2}\right)^2}$

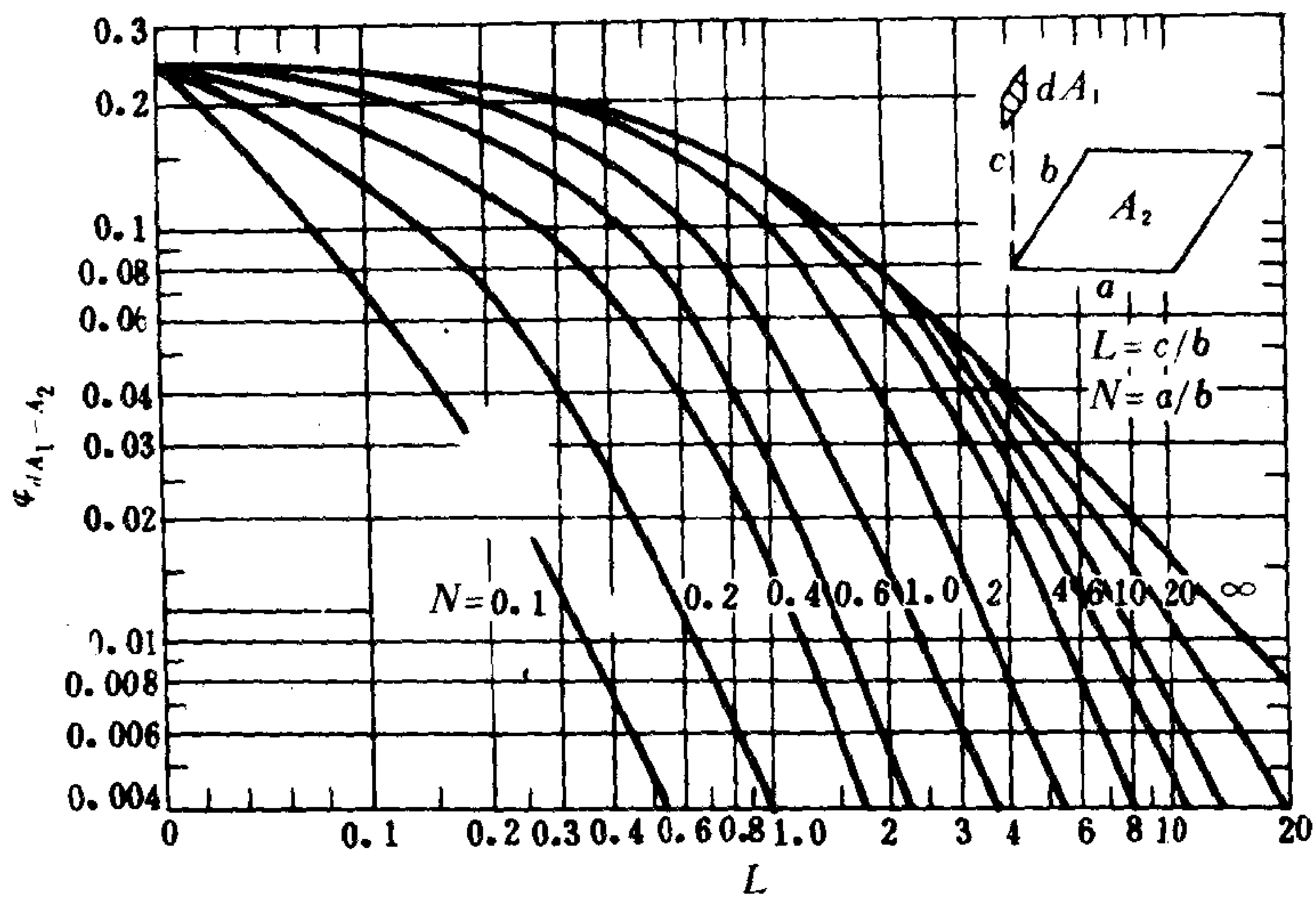


图 1.1.5-20　dA_1与A_2的求角系数线图（dA_1垂直于A_2）

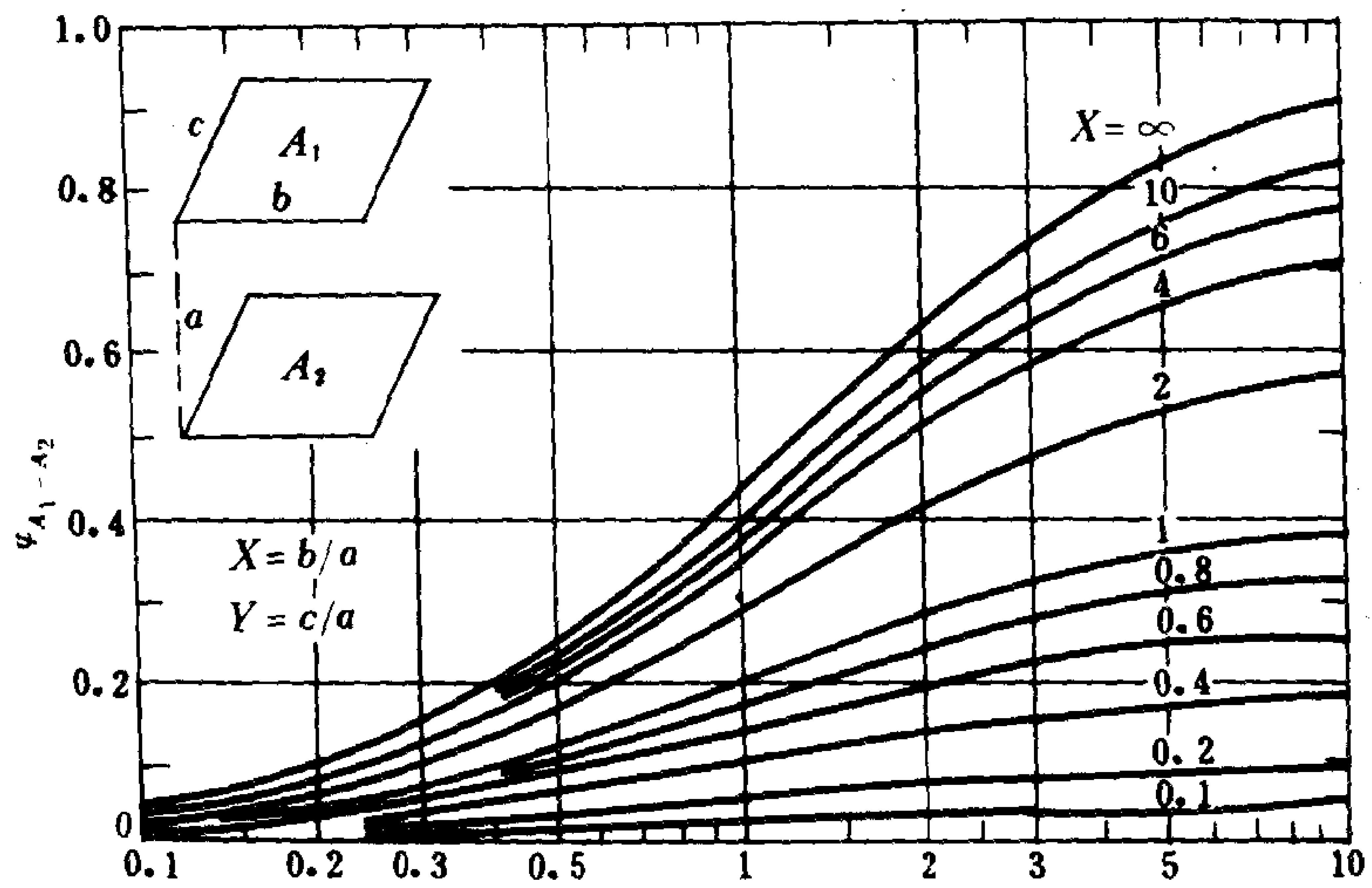


图 1.1.5-21　两块相同尺寸的平行矩形面间的求角系数线图

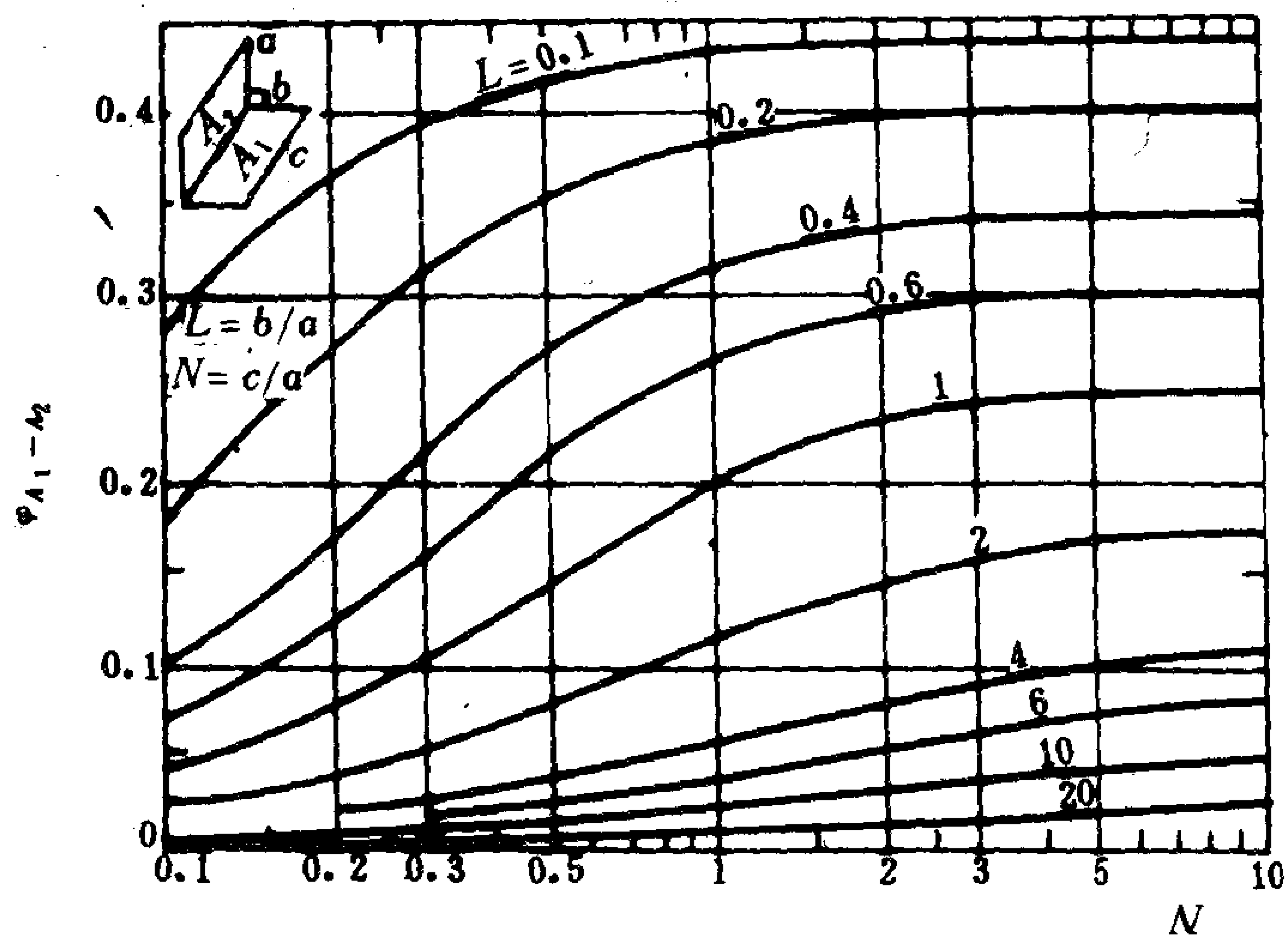


图 1.1.5-22　两块相互垂直的矩形面间的求角系数线图

续上表

换 热 表 面	角系数的计算公式
3．无凹面的物体1处于物体2的包围中，或与物体2构成一封闭腔	$\varphi_{1,2}=1$ $\varphi_{2,1}=F_1/F_2$ F_1，F_2为表面1和2的面积
4．两直径相同的平行圆柱	$\varphi_{1,2}=\varphi_{2,1}$ $\varphi_{1,2}=\frac{1}{\pi}\left[\arcsin\frac{d}{s}+\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}-\frac{s}{d}\right]$

表1.1.5-23　各种辐射换热系统的辐射网络图

辐射换热系统	辐 射 网 络
1. 两个灰表面间的辐射换热	$Q_{1,2}$: E_{b1} — $\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1F_1}$ — J_1 — $\frac{1}{F_1\varphi_{1,2}}$ — J_2 — $\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2F_2}$ — E_{b2} $Q_{12}=\dfrac{E_{b1}-E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1F_1}+\frac{1}{F_1\varphi_{1,2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2F_2}}$
2．两灰表面间插入一块不计导热热阻遮热板的辐射换热	$Q_{1,2}$: E_{b1} — $\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1F_1}$ — J_1 — $\frac{1}{F_1\varphi_{1s}}$ — J_{s1} — $\frac{1-\varepsilon_{s1}}{F_{s1}\varepsilon_{s1}}$ — E_{bs} — $\frac{1-\varepsilon_{s2}}{F_{s2}\varepsilon_{s2}}$ — J_{s2} — $\frac{1}{F_2\varphi_{2s}}$ — J_2 — $\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2F_2}$ — E_{b2}

续上表

辐射换热系统	辐 射 网 络
3．三个灰表面间的辐射换热	Q_1 Q_2 E_{b1} J_1 $\frac{1}{F_1\varphi_{1,2}}$ J_2 E_{b2} $\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 F_1}$ $\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 F_2}$ $\frac{1}{F_1\varphi_{1,3}}$ $\frac{1}{F_2\varphi_{2,3}}$ J_3 $\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3 F_3}$ Q_3 E_{b3} J_1节点 $\frac{E_{b1}-J_1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1F_1}}+\frac{J_1-J_2}{\frac{1}{F_1\varphi_{12}}}+\frac{J_1-J_3}{\frac{1}{F_1\varphi_{13}}}=0$ J_2节点 $\frac{J_1-J_2}{\frac{1}{F_1\varphi_{12}}}+\frac{E_{b2}-J_2}{\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2F_2}}+\frac{J_2-J_3}{\frac{1}{F_2\varphi_{23}}}=0$ J_3节点 $\frac{E_{b3}-J_3}{\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3F_3}}+\frac{J_2-J_3}{\frac{1}{F_2\varphi_{23}}}+\frac{J_1-J_3}{\frac{1}{F_3\varphi_{13}}}=0$ 三个方程中只有 J_1、J_2、J_3 为待定值可解。求得 J_1、J_2、J_3 便可求得 Q_1、Q_2及Q_3 值。

例：一小炉窑长 0.5 m，宽 0.4 m，高 0.3 m。窑顶和周壁温度为 300℃，黑度为0.8。窑底面温度为 150℃，黑度为 0.6。试计算顶和周壁对炉底面的辐射换热量。

解：这是属于两个灰体表面间的辐射换热问题，可用表 1.1.5-23 中网络图 1 所列计算公式。

$$Q_{1,2}=\frac{E_{b1}-E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1F_1}+\frac{1}{F_1\varphi_{1,2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2F_2}}=\frac{\sigma_0\ (T_1^4-T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1F_1}+\frac{1}{F_1\varphi_{1,2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2F_2}}$$

设窑底面积为 F_1，窑顶和周壁为 F_2，则

$\varepsilon_1=0.6$；$T_1=150+273=423\text{ K}$

$F_1=0.4\times0.5=0.2\text{ m}^2$

$\varepsilon_2=0.8$；$T_2=300+273=573\text{ K}$；

$F_2=0.4\times0.5+2\times\ (0.4\times0.3)+2\times\ (0.5\times0.3)=0.74\text{ m}^2$

查表 1.1.5-22 第三项得 $\varphi_{1,2}=1$，则

$$Q_{1,2}=\frac{5.6\times10^{-8}\times\ (423^4-573^4)}{\frac{1-0.6}{0.6\times0.2}+\frac{1}{0.2\times1}+\frac{1-0.8}{0.8\times0.74}}=\frac{-4297.8}{8.66}=-495.8\text{ W}$$

$Q_{2,1}=495.8\text{ W}$

窑顶和周壁对窑底的辐射换热量为 495.8 W

4.3 太阳辐射

对船舶，夏季的空调、冷藏船的隔热要削弱太阳辐射。反之，对太阳能的利用又要设法使各种集热器吸收更多的太阳辐射。太阳辐射中的能量分布，红外线占 48.3%；可见光部分

占 43%；紫外线部分占 8.7%。

4.3.1 太阳辐射能

经过多年对太阳辐射的实测，得出太阳常数 $G_S=1353\ W/m^2$，其定义为：当地球位于和太阳的距离处于年平均值时，在大气层外缘并与太阳射线垂直的单位表面上所接受的太阳辐射能。

由于大气中的H_2O、CO_2、O_2、O_3 以及尘埃对阳光有吸收、散射和反射等作用，因此在中纬度地区地面上正午前后 4 小时以内太阳辐射能只有 1000 W/m^2。

而在城市中，由于存在工业污染使得阳光射到地面的能量还要减弱 10～20%。通常在城市取阳光的辐射能为 800 W/m^2。若受阳光照射的表面与射线不垂直，而与受射面的法线有夹角 θ，则按余弦定律还要乘以 $\cos\theta$。

太阳辐射投向物体表面的能量与地区纬度、时间、以及二者的相对位置有关，其值用 E_S W/m^2表示，称作太阳照射力。列表于 1.1.5-24。

表 1.1.5-24　　晴天在纬度 40°处的太阳照射力 E_S [6]

时间	竖表面			横表面
	朝东	朝南	朝西	
	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
6 点	227			46.5
9 点	611	81		675
12 点		244		948
15 点		81	611	675
18 点			227	46.5

4.3.2 物体表面对太阳辐射的吸收率 A_S

工程材料对于红外线热辐射来说，其吸收率 A 与其黑度 ε 值相等。但对太阳辐射能来说，表面的颜色对吸收率 A_S 影响很大，而其吸收率 A_S 不等于黑度 ε，并且差别很大。例如白漆表面的 $A_S=0.12$，而 $\varepsilon=0.90$。所以冷藏船刷成白色可节省制冷量。太阳能集热器要求换热表面 A_S 尽可能接近于 1，而它的黑度 ε 又应小一些。例如，可用电化学方法在镀锌钢板上涂黑镍，其 $A_S=0.9$，$\varepsilon=0.13$，有效地改善了太阳能集热器的吸热作用。表 1.1.5-25 列出几种表面的 A_S 及 ε 值。

表 1.1.5-25　　不同表面对太阳辐射的吸收率 A_S 和它在常温下黑度 ε 值[2][6]

表面名称	对太阳辐射的吸收率 A_S	常温下的黑度 ε
涂在镀锌铜上的黑镍	0.90	0.13
黑丙烯酸漆涂层	0.91	0.50
涂在钢上的黑铁	0.89	0.17
不锈钢	0.20	0.09
铝箔	0.18	0.03
白纸	0.28	0.95
沥青	0.90	0.90
黑色漆面	0.96	0.95
白色及其它浅色漆面	0.12～0.16	0.90～0.95

4.3.3 物体、天空、太阳三者间的辐射换热

受阳光照射的物体1既吸收太阳的辐射能又向太阳以外的天空2辐射热能。物体1净得的辐射能 $Q_{1,2}$是收支辐射能的代数和，可列计算式为

$$Q_{1,2}=A_{s,1}F_1E_s-5.669\,\varepsilon_1\varphi_{1,2}F_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\quad \text{W} \qquad (1.1.5\text{-}46)$$

式中：$Q_{1,2}$——物体1净得的辐射热，W；

$\varphi_{1,2}$——物体1所发射出的辐射能可射入太空的百分数，即角系数；

T_1——物体1表面温度，K；

T_2——包围物体1的天空温度，冬天夜晚晴空 $T_2\approx227$ K，有云的天空 $T_2\approx250$ K。在晴朗的白天夏季时 $T_2\approx T_{大气}-6$，冬季，$T_2\approx T_{大气}-20$；

E_s——太阳对物体的照射力，可查表1.1.5-24；

$A_{s,1}$——物体1的太阳辐射吸收率；可查表1.1.5-25；

F_1——物体1的表面积，m^2；

ε_1——物体1的黑度。

对太阳能集热器表面要选用 A_s 大、ε小的材料才能提高集热器的吸热量。对冷藏船，船舶的船楼为了减小太阳辐射要选用 A_s 小的白色涂漆。

4.3.4 太阳辐射下的平衡温度

地球上物体受到的辐射热总量，是太阳辐射和大气层漫射之和。在晴天时，后者只占总量的10%。船壳表面在阳光照射下的平衡温度，应该是表面净得的辐射热等于表面对流换热和导热时的温度。略去船壳外表面向船内的导热量，则可列出以下求平衡温度的计算式

$$5.669\,\varepsilon_1\varphi_{1,2}F_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]-A_{s,1}F_1E_s+\alpha F_1\ (T_1-T_f)=0$$

式中，α 为对流换热系数，T_f 为大气温度，T_1为平衡温度，其它符号同式（1.1.5-46）中符号。

例：两艘船停泊在海上，一艘为刷成白色的冷藏船，另一艘船舷为黑色的运煤船，地处北纬40度，在下午3时船舷向西处日照下的平衡温度各为多少？已知当时气温为30℃，对流换热系数 $\alpha=6$ W/（$m^2\cdot K$），天空温度比气温低6℃。

解：查表1.1.5-24得太阳照射力 $E_s=611$ W/m^2；

查表1.1.5-25得黑漆的$A_s=0.96$，白漆的 $A_s=0.12$，黑漆与白漆的辐射黑度 $\varepsilon=0.95$；$\varphi_{1,2}$近似取1。

用试算法求黑色油漆竖直壁面的平衡温度值：

$$5.67\times0.95\times1\times\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{297}{100}\right)^4\right]-0.95\times611+6\ (T_1-303)=0$$

$$5.3\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-419-580.45+6\,T_1-1818=0$$

由此得平衡温度 $T_1=345$ K，$t_1=72$℃。

白色油漆竖直壁面的平衡温度值为：

$$5.67\times0.95\times1\times\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{297}{100}\right)^4\right]-0.12\times611+6\ (T_1-303)=0$$

$$5.13\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-419-73.32+6\,T_1-1818=0$$

求得 $T_1=301\,\text{K}$， $t_1=34℃$

可见冷藏船为了减少制冷量必须刷成白色以减少太阳辐射。

4.4 气体辐射

热辐射对于双原子气体、如氮、氧以及空气等，可以认为是透明介质。对于多原子气体、如二氧化碳和水蒸汽，就具有放出辐射能和吸收辐射的能力。所以称这些气体为吸收性介质。

4.4.1 气体对辐射能具有选择性

图 1.1.5-23 为黑体、灰体和吸收性气体的辐射光谱和吸收光谱图。

从图可以看出黑体与灰体对所有波长的辐射能都具有放射和吸收的能力，因此其光谱是连续的。多原子气体具有选择辐射或吸收某一定波长范围 $\Delta\lambda$ 光带内辐射的能力，而对于这一光带以外的辐射能该气体为透明体。

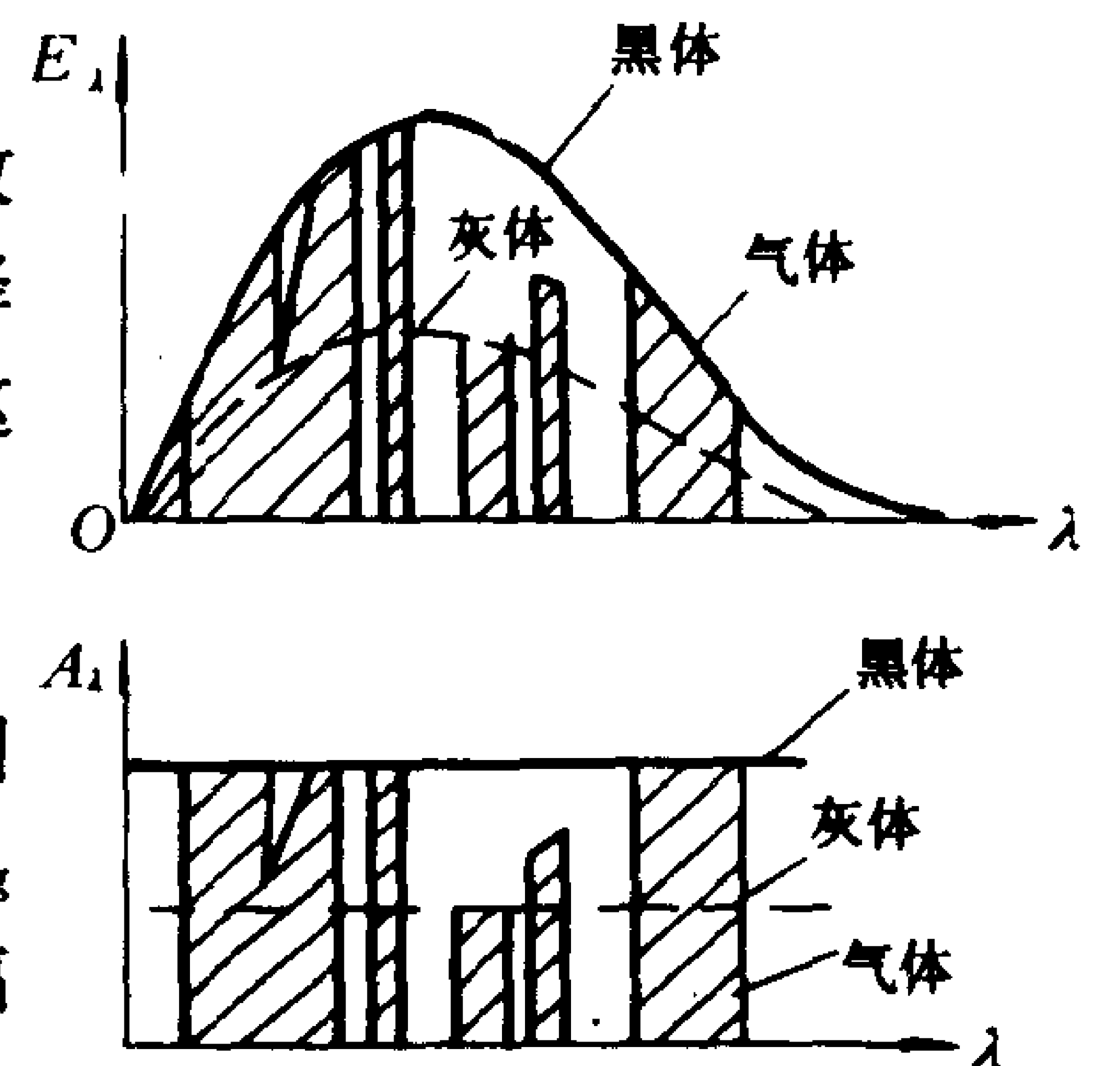


图 1.1.5-23
黑体、灰体和气体的辐射和吸收光谱

4.4.2 烟气的黑度及吸收率

气体的吸收和放出辐射能是在整个气体容积内进行的。因此，高温烟气与包壳壁的辐射与烟气黑度 ε_g 以及吸收率 A_g 有关。而烟气的黑度与吸收率又决定于在烟气中具有选择性辐射特点的二氧化碳和水蒸汽分压力 P_{CO_2}、P_{H_2O} 以及射线在包壳内的平均有效行程。工程上提供线图来求得烟气的具体 ε_g 与 A_g 值。

4.4.3 气体与壁面辐射换热的计算公式

烟气与固体壁面的辐射换热量为

$$q_{g.w}=5.669\,\frac{\varepsilon_w+1}{2}\left[\varepsilon_g\left(\frac{T_g}{100}\right)^4-A_g\left(\frac{T_w}{100}\right)^4\right]\quad \text{W/m}^2 \tag{1.1.5-47}$$

式中：T_g——烟气的绝对温度；

T_w——壁面的绝对温度；

ε_w——壁面黑度；

ε_g——烟气黑度；

A_g——烟气对来自壁面辐射的吸收率。

通常烟气的 $\varepsilon_g=0.1\sim0.2$，$A_g=0.12\sim0.26$，壁面黑度$\varepsilon_w\approx0.9$。T_g 比 T_w高得愈多时，$q_{g.w}$ 便愈大。可见，在锅炉炉膛内的辐射换热量要比烟气在锅炉管束中的辐射换热量要大。

5 传热与换热器计算

在锅炉中烟气对炉管中水或水蒸汽的传热过程可以分解为烟气对管外壁的对流换热和辐射换热，管外壁对管内壁的导热过程以及管内壁对水的对流换热过程。对薄壁管可近似地认为管内、外壁面积相差不大，而按平壁传热来计算。对于厚壁管如包上绝热材料的蒸汽管道，必须按圆管公式计算。对于管外带肋壁的传热计算，由于管外介质对肋壁与管壁的对流换热系数 α 值不一样，再加上肋壁导热热阻使肋根与肋壁的温度不一样，因此带肋管的传热计算更为复杂。下面讨论不同情况下的各种传热过程。

5.1 传热计算公式

平壁 $q=k\ (t_1-t_2)=\dfrac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{\delta}{\lambda}+\dfrac{1}{\alpha_2}}\ (t_1-t_2)$ W/m² (1.1.5-48)

圆筒壁 $q_1=k_1\ (t_1-t_2)\ \dfrac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1\pi d_1}+\dfrac{1}{2\pi\lambda}\ln\dfrac{d_2}{d_1}+\dfrac{1}{\alpha_2\pi d_2}}\ (t_1-t_2)$ W/m

(1.1.5-49)

肋壁 $Q=k_fF_2\ (t_1-t_2)=\dfrac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1F_1}+\dfrac{\delta}{\lambda F_1}+\dfrac{1}{\alpha_2F_2\eta_t}}\ (t_1-t_2)$ W (1.1.5-50)

式中，k_f 是以加肋一侧壁面积为基准的传热系数值；α_1、F_1 为光壁一侧的换热系数及壁面积；α_2、F_2、η_t 为带肋一侧的换热系数、换热壁面积以及考虑肋型等因素对流换热量的影响的总校正系数，也称肋壁总效率。

$$\eta_t=\frac{F_r}{F_2}+\frac{F_f}{F_2}\eta_f \quad (1.1.5\text{-}51)$$

式中，F_r 为带肋一侧根部换热面积，F_f 为肋的换热面积，F_2 为 F_r 与 F_f 之和，η_f 可由表 1.1.5-7 中线图求得。

对于多层平壁以及多层圆筒壁的传热计算公式，只需在导热热阻项内写上多层导热热阻即可。查表 1.1.5-5。

5.2 热管传热计算

表 1.1.5-26 中图示的一根带肋热管表明可有效地将热烟气的热能传送给冷空气。现将这根管内有吸液蕊的热管的传热机理简述如下：将热管抽成真空后注入适量工质。工质按应用于高温、中温或低温的不同情况可选用金属钠、蒸馏水或者 R 12 等。热流体对蒸发段加热，使工质沸腾形成蒸汽迅速上升在冷凝段凝结放热，把热量传递给流体。凝结液通过热管内壁用多层金属丝网组成的吸液蕊借毛细管作用流回到蒸发段。从蒸发段将热量传送到冷凝段的这种方式要比同样尺寸的金属棒要大几十倍。表 1.1.5-26 中列出单根带肋热管的各部分热阻计算公式。

管内没有吸液蕊的热管，冷凝液靠重力才能由冷凝段流回到蒸发段，因此热管必须是冷凝段朝上放置。这种重力式热管的管内热阻为凝结放热和沸腾放热热阻之和。每根热管的传热量为

$$Q=\frac{t_1-t_2}{\sum\limits_{i=1}^{n}r_i}=kF(t_1-t_2) \quad \text{W} \quad (1.1.5\text{-}52)$$

式中，$\sum\limits_{i=1}^{n}r_i$ 为热管总热阻，k 为热管传热系数，F 为热管的传热面积。由多根热管组成的热管换热器的计算方法可见换热器一节。

表 1.1.5-26　　　　　　　　单根带肋热管各部分热阻公式

图　示	热　阻　名　称	计　算　公　式
冷凝段　α_c　$F_{c,o}$	冷凝段：冷流体与热管外壁的热阻	$r_1=\dfrac{1}{\alpha_c F_{c,o}\eta_{t,c}}$
	冷凝段：管壳内外壁间导热热阻	$r_2=\dfrac{l_n(d_0/d_i)}{2\pi\lambda L_c}$
	冷凝段：管内壁对工质的热阻　有吸液蕊	$r_3=\dfrac{l_n(d_i/d_w)}{2\pi\lambda_{w.c}L_c}$
	冷凝段：管内壁对工质的热阻　无吸液蕊	$r_3=\dfrac{1}{\alpha_{c.i}F_{c.i}}$
蒸发段　α_e　$F_{e,o}$	蒸发段：管内壁对工质的热阻　有吸液蕊	$r_4=\dfrac{l_n(d_i/d_w)}{2\pi\lambda_{w,e}Le}$
	蒸发段：管内壁对工质的热阻　无吸液蕊	$r_4=\dfrac{1}{\alpha_{e.i}F_{e.i}}$
	蒸发段：管壳内外壁间导热热阻	$r_5=\dfrac{l_n(d_0/d_i)}{2\pi\lambda L_e}$
	蒸发段：热流体与热管外壁的热阻	$r_6=\dfrac{1}{\alpha_e F_{e,o}\eta_{t,e}}$
图中：d_0、d_i、d_w 为热管的外径、内径、吸液蕊内径；λ 为热管材料的导热系数；$\lambda_{w.c}$、$\lambda_{w.e}$为冷凝段内及蒸发段内吸液蕊的有效导热系数；$F_{c.o}$、$F_{e.o}$为热管冷凝段及蒸发段的外侧换热面积；$F_{c.i}$、$F_{e.i}$为热管冷凝段及蒸发段内侧的换热面积。		式中：α_c、$\eta_{t.c}$、L_c为冷凝段壁面与冷流体的换热系数，冷凝段肋壁效率、冷凝段长度；$\alpha_{c.i}$为冷凝段管内壁与蒸汽的凝结换热系数。符号角标为 e 者对蒸发段应用的各量。

5.3　平均温差

在传热过程中冷流体受热温度不断上升，热流体受冷却温度不断下降，因此上述传热计算公式中的 t_1 及t_2 是热流体和冷流体的平均温度。$t_1-t_2=\Delta t_m$ 称为平均温差。

当近似计算时可采用算术平均温差。

$$\Delta t_m=\left(\frac{t_1'+t_1''}{2}\right)-\left(\frac{t_2'+t_2''}{2}\right) \tag{1.1.5-53}$$

式中，t_1'、t_1'' 为热流体进出口温度，t_2'、t_2'' 为冷流体进出口温度。

算术平均温差基于冷流体与热流体的温度呈直线变化。实际上温度沿换热面积都呈曲线变化，如图 1.1.5-24 所示。可见实际的平均温差将小于算术平均温差。

对于顺流方式的换热器，其对数平均温差为

$$\Delta t_m=\frac{(t_1'-t_2')-(t_1''-t_2'')}{\ln\left(\dfrac{t_1'-t_2'}{t_1''-t_2''}\right)} \tag{1.1.5-54}$$

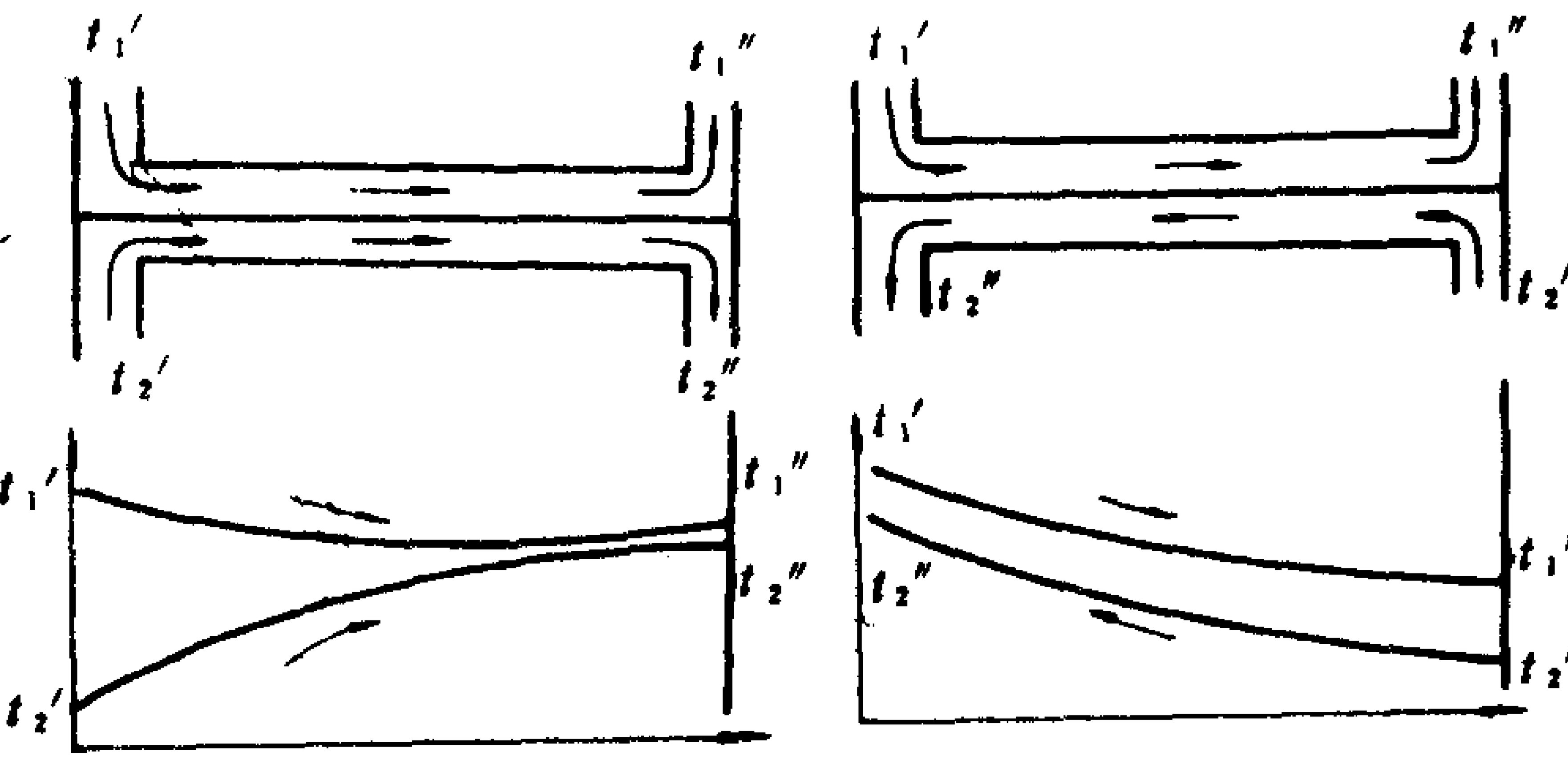


图 1.1.5-24　冷热流体的流动情况和温度变化

对于逆流方式的换热器，其对数平均温差为

$$\Delta t_{m}=\frac{(t_1'-t_2'')-(t_1''-t_2'')}{\ln\left(\frac{t_1'-t_2''}{t_1''-t_2'}\right)} \tag{1.1.5-55}$$

按 1.1.5-24 图所示上二式可用同一公式如下

$$\Delta t_{m}=\frac{\Delta t_{大}-\Delta t_{小}}{\ln\frac{\Delta t_{大}}{\Delta t_{小}}} \tag{1.1.5-56}$$

对于其他流动方式，如叉流等，换热器的对数平均温差修正系数 ϕ 值小于 1。在作估算时，可不用修正。

5.4 表面式换热器的热阻和计算方法

换热器冷热流体的传热量 Q 可由下列三式表示。

热流体的放热量

$$Q=\dot{m}_1C_{p_1}(t_1'-t_1'') \quad \text{W} \tag{1.1.5-57}$$

冷流体的吸热量

$$Q=\dot{m}_2C_{p_2}(t_2''-t_2') \quad \text{W} \tag{1.1.5-58}$$

通过换热器传热壁面的热量

$$Q=kF(t_1-t_2)=\frac{\Delta t_m}{1/(kF)} \quad \text{W} \tag{1.1.5-59}$$

若不计换热器对外界的热损失，以上三式相等。式中 $1/(kF)$ 称为表面式换热器的传热热阻，它与换热器的大小型式，流体的种类及对流换热方式等有关。流体的质量流量 $\dot{m}$ 与比热 C_p 的乘积 $\dot{m}C_p$ 简称流体的热容流量。各种典型换热器的传热热阻的计算公式列于表 1.1.5-27。

壁面污垢热阻是由于换热器运行一段时间后，流体在壁面堆积的一层污垢，如锅炉换热壁面烟气一侧的烟灰以及水一侧的水垢。污垢厚度 δ_F 除以污垢的导热系数 λ_F，称为污垢系数 r_F，用下式表示

$$r_F=\delta_F/\lambda_F \tag{1.1.5-60}$$

污垢系数除以换热器换热面积 F，称为壁面 F 的污垢热阻，其单位为 ℃/W。不同换热器内污垢的形成厚度及其性质都不一样。因此确定污垢系数是一个很复杂的问题，各换热器公司从大量运行资料中得出不少经验数据。表 1.1.5-28 列出有关污垢系数 r_F 的参考值，供计算换热器时用。

当近似估算时，可在表 1.1.5-29 所列各种换热器的传热系数 k 值中选取合适的值，应用传热计算公式确定出传热量 Q 值。

表 1.1.5-27　　典型换热壁面的传热热阻

壁　面　型　式	通过壁面冷热流体间的传热热阻　$1/(kF)$　K/W
平壁	$\frac{1}{kF}=\frac{1}{F}\left(\frac{1}{\alpha_1}+r_{F_1}+\frac{\delta}{\lambda}+r_{F_2}+\frac{1}{\alpha_2}\right)$
圆筒壁	$\frac{1}{kF}=\frac{1}{\pi l}\left(\frac{1}{d_1\alpha_1}+\frac{r_{F_1}}{\alpha_1}+\frac{\ln(d_0/d_1)}{2\lambda}+\frac{r_{F_2}}{d_0}+\frac{1}{d_0\alpha_2}\right)$
平壁两侧带肋片	$\frac{1}{kF}=\left[\left(\frac{1}{\alpha_1}+r_{F_1}\right)\frac{1}{F_1\eta_{t_1}}\right]+\frac{\delta}{\lambda F}+\left[\left(\frac{1}{\alpha_2}+r_{F_2}\right)\frac{1}{F_2\eta_{t_2}}\right]$

续上表

壁 面 型 式	通过壁面冷热流体间的传热热阻 $1/(kF)$ K/W
圆筒壁外侧带肋片	$\frac{1}{kF}=\frac{1}{\pi d_1 l}\left(\frac{1}{\alpha_1}+r_{F_1}\right)+\frac{\ln(d_0/d_1)}{2\pi\lambda L}+\left[\left(r_{F_2}+\frac{1}{\alpha_2}\right)\frac{1}{F_2\eta_{t_2}}\right]$

式中：k——传热系数，W/(m²·K)；
F——传热面积（不计肋），m²；
d_1，d_0——圆筒内外直径，m；
α——换热系数，W/(m²·K)；
r_F——污垢系数，m²K/W；
L——圆筒壁长度，m；
η_t——肋壁总效率；
δ——不计肋的传热壁厚，m。
角标：1——与流体1接触的一侧.
2——与流体2接触的一侧.

表 1.1.5-28　　污垢系数r_F的参考值 [m²·K/W]〔1〕

1．水的污垢系数

热流体温度,℃	<115		115～205	
水温,℃	<50		>50	
水速，m/s	<1	>1	<1	>1
海 水	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002
硬度不高的自来水和井水	0.0002	0.0002	0.0004	0.0004
河 水	0.0006	0.0004	0.0008	0.0006
硬水（>257 g/m³）	0.0006	0.0006	0.001	0.001
锅炉给水	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002
蒸馏水	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
冷水塔或喷水池				
水经过处理	0.0002	0.0002	0.0004	0.0004
未经过处理	0.0006	0.0006	0.001	0.0008
多泥沙的水	0.0006	0.0004	0.0008	0.0006

2．几种流体的污垢系数

油		蒸气和气体		液 体	
燃料油	0.001	有机蒸气	0.0002	有机物	0.0002
润滑油，变压器油	0.0002	水蒸气（不含油）	0.0001	制冷剂液	0.0002
淬火油	0.0008	废水蒸气（含油）	0.0002	盐水	0.0004
植物油	0.0006	制冷剂蒸气（含油）	0.0004	石油制品	0.0002～0.001
		压缩空气	0.0004		
		燃气、焦炉气	0.002		
		天然气	0.002		

表 1.1.5-29　　常用热交换器的传热系数k的大致范围〔1〕

热交换器型式	热交换流体		传热系数 k	备 注
	内 侧	外 侧	W/(m²·K)	
管壳式（光管）	气	气	10～35	常压
	气	高压气	170～160	20～30 MPa
	高压气	气	170～450	20～30 MPa
	气	清水	20～70	常压
管壳式（光管）	高压气	清水	200～700	20～30 MPa
	清水	清水	1000～2000	
	清水	水蒸气凝结	2000～4000	
	高粘度液体	清水	100～300	液体层流
	高温液体	气体	30	
	低粘度液体	清水	200～450	液体层流

续上表

热交换器型式	热交换流体		传热系数 k W/(m²·K)	备注
	内侧	外侧		
盘香管（外侧沉浸在液体中）	水蒸汽凝结	搅动液	700～2000	铜管
	水蒸汽凝结	沸腾液	1000～3500	铜管
	冷水	搅动液	900～1400	铜管
	水蒸汽凝结	液	280～1400	铜管
	清水	清水	600～900	铜管
	高压气	搅动水	100～350	铜管，20～30 MPa
套管式	气	气	10～35	
	高压气	气	20～60	20～30 MPa
	高压气	高压气	170～450	20～30 MPa
	高压气	清水	200～600	20～30 MPa
	水	水	1700～3000	
板式（人字形板片）	清水	清水	3000～3500	水速在 0.5 m/s左右
（平直波纹板片）	清水	清水	1700～3000	水速在 0.5 m/s左右
	油	清水	600～900	水速与油速都在 0.5 m/s左右
板翅式	清水	清水	3000～4500	
	冷水	油	400～600	以油侧面积为准
	油	油	170～350	
	气	气	70～200	
	空气	清水	80～200	空气侧质量流速 12～40 kg/(m²·s) 以气侧面积为准

5.5 传热单元数法

当设计计算时，根据冷热流体的平均温差 Δt_m 以及换热器的传热热阻，便可计算出换热器的传热量 Q。但对于已有的换热器，作校核计算时，只知道冷热流体的进口温度 t'_1 及 t'_2 以及冷热流体的热容量 $\dot{m}_1 C_{p1}$及 $\dot{m}_2 C_{p2}$，而冷热流体的终温为未知数，当然无法确定平均温差 Δt_m，也计算不出传热量 Q。因此只得先设定 t''_1及 t''_2值，用多次试算，逐渐逼近的方法来求解。现介绍传热单元法（NTU 法 *Number of Heat transfer unit*）来进行校核计算。

传热单元数 N、传热有效度 E 以及热容流量比 R 的定义式如下：

$$N = kF/(\dot{m}C_p)_{min} \tag{1.1.5-61}$$

$$E = (t' - t'')_{max}/(t''_1 - t'_2) \tag{1.1.5-62}$$

$$R = (\dot{m}C_p)_{min}/(\dot{m}C_p)_{max} \tag{1.1.5-63}$$

式中：
k——热交换器传热系数；
F——传热面积；
$(t' - t'')_{max}$——冷热流体中进出温差较大者；
$(\dot{m}C_p)_{min}$——冷热流体二者中热容流量较小者；
$(\dot{m}C_p)_{max}$——冷热流体二者中热容流量较大者。

上列N、E、R 皆为无因次量，对于不同的换热器型式，它们之间存在不同的函数关系。因此工程上把常用的几种换热器以及冷流体在换热器内不同流动方式的 N、E、R 关系制成专用的线图，供工程上计算用。只要已知传热单元数 N 以及热容热量比 R，便可确定你

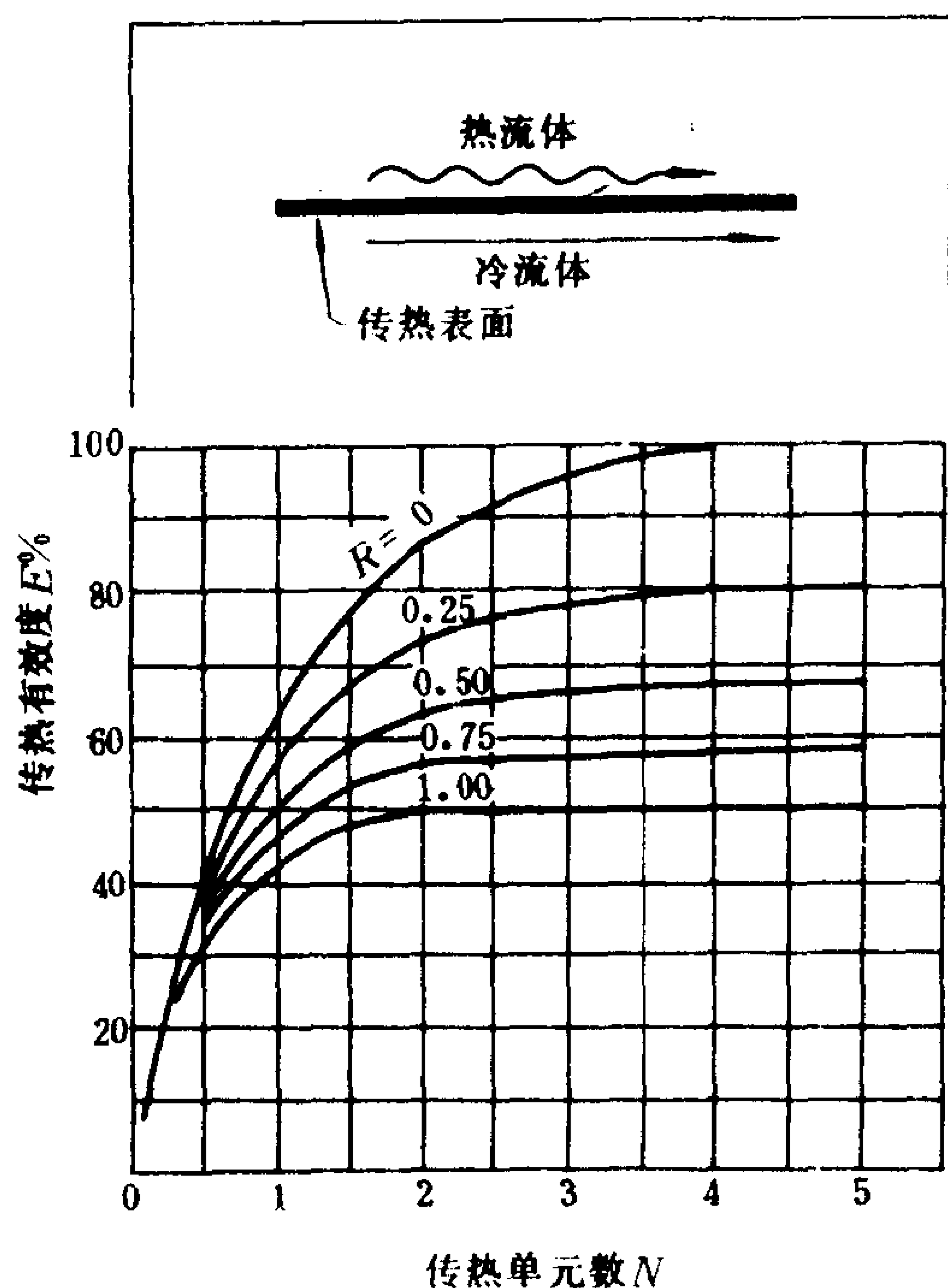


图 1.1.5-25　顺流式换热器

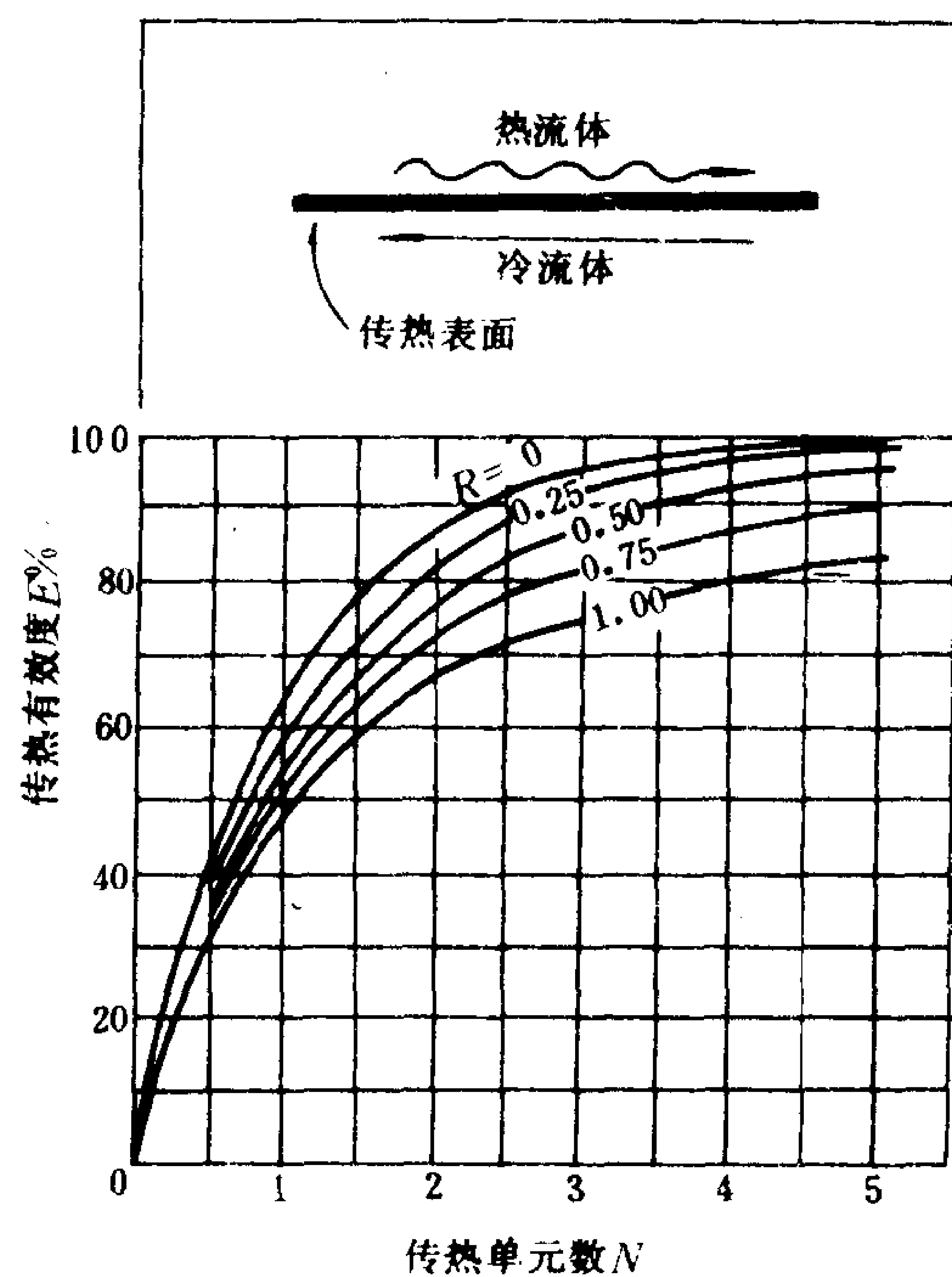


图 1.1.5-26　逆流式换热器

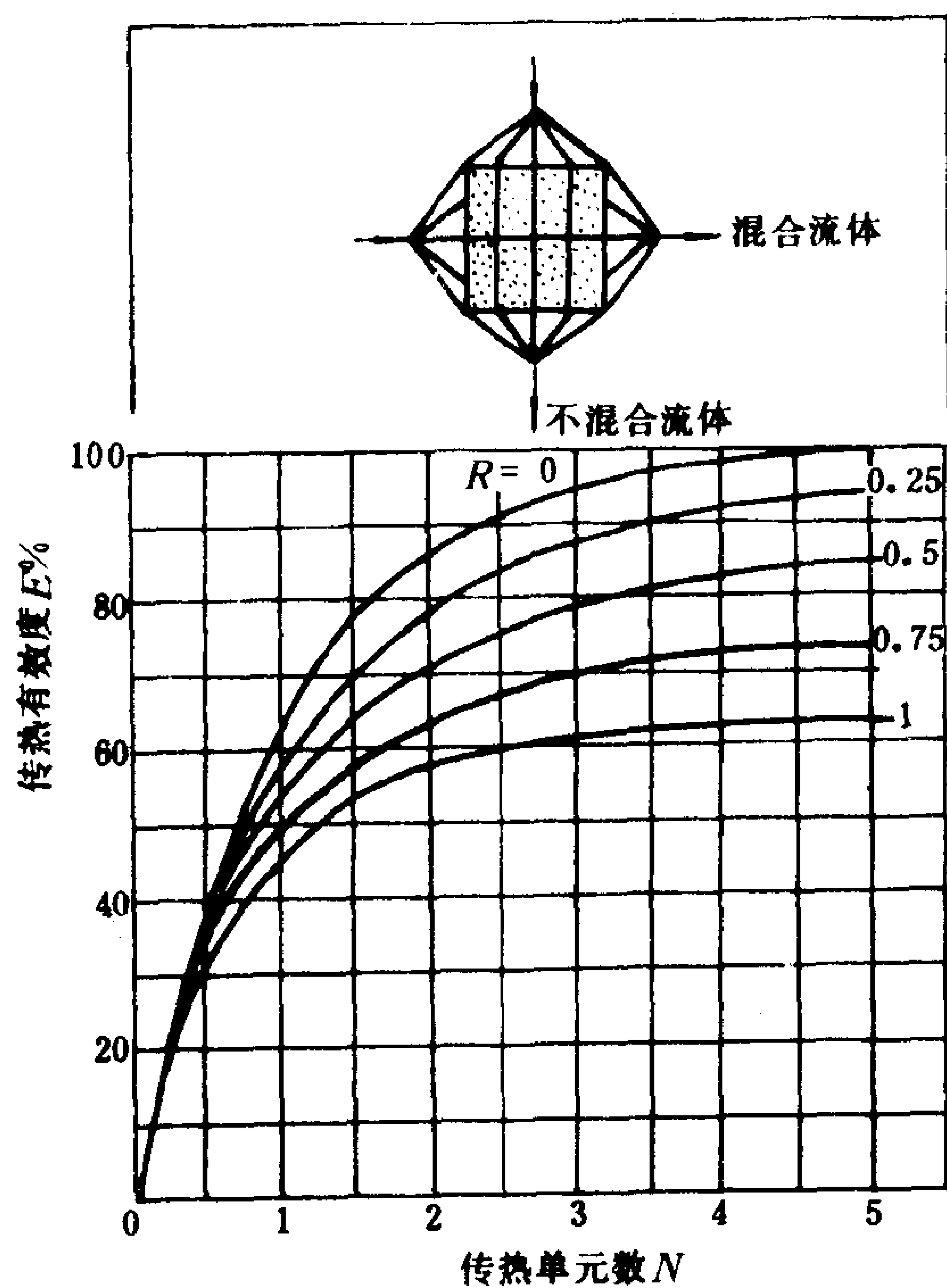


图 1.1.5-27　一侧混合另一侧为不混合的换热器

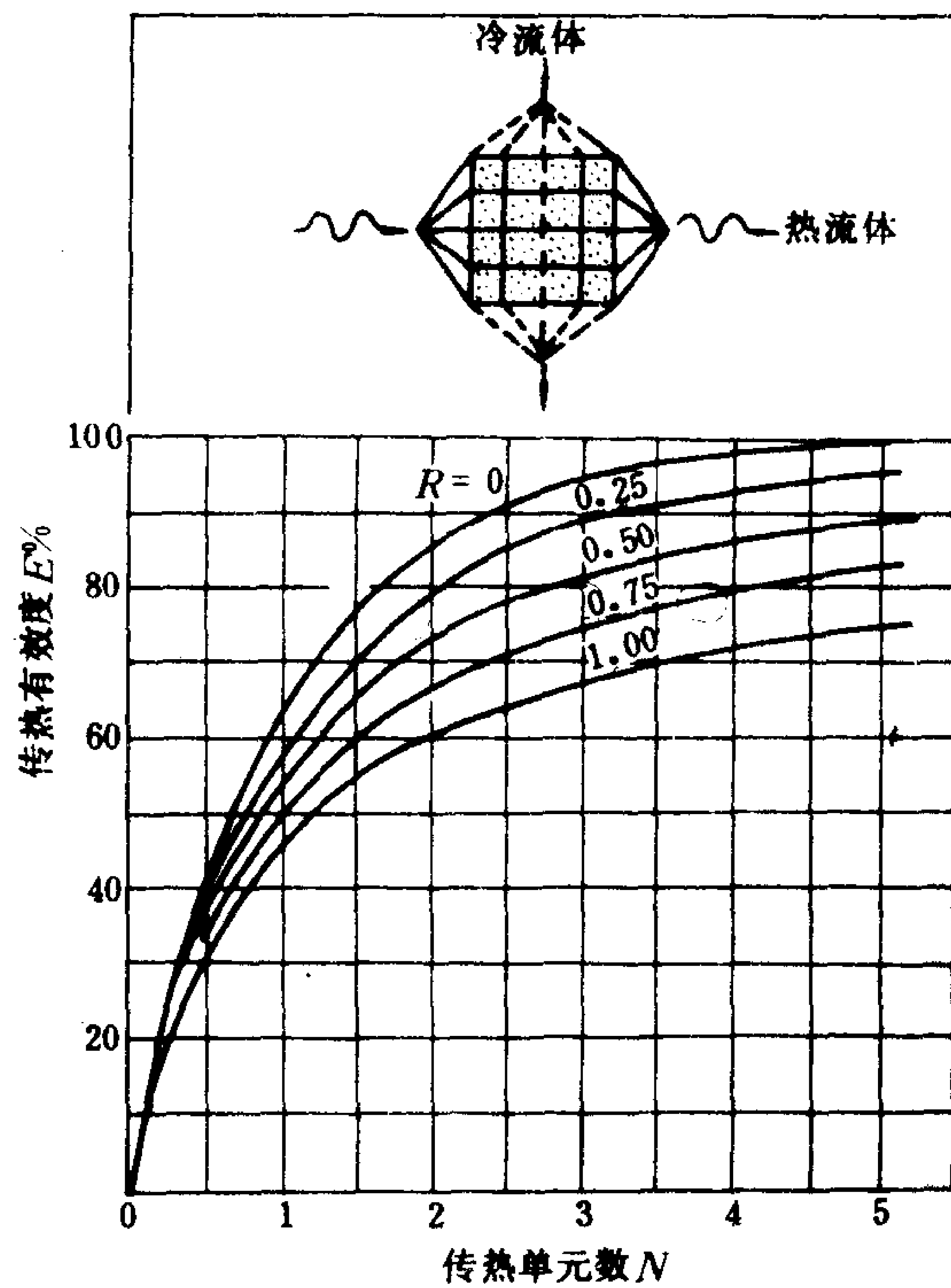


图 1.1.5-28　二侧均不混合的换热器

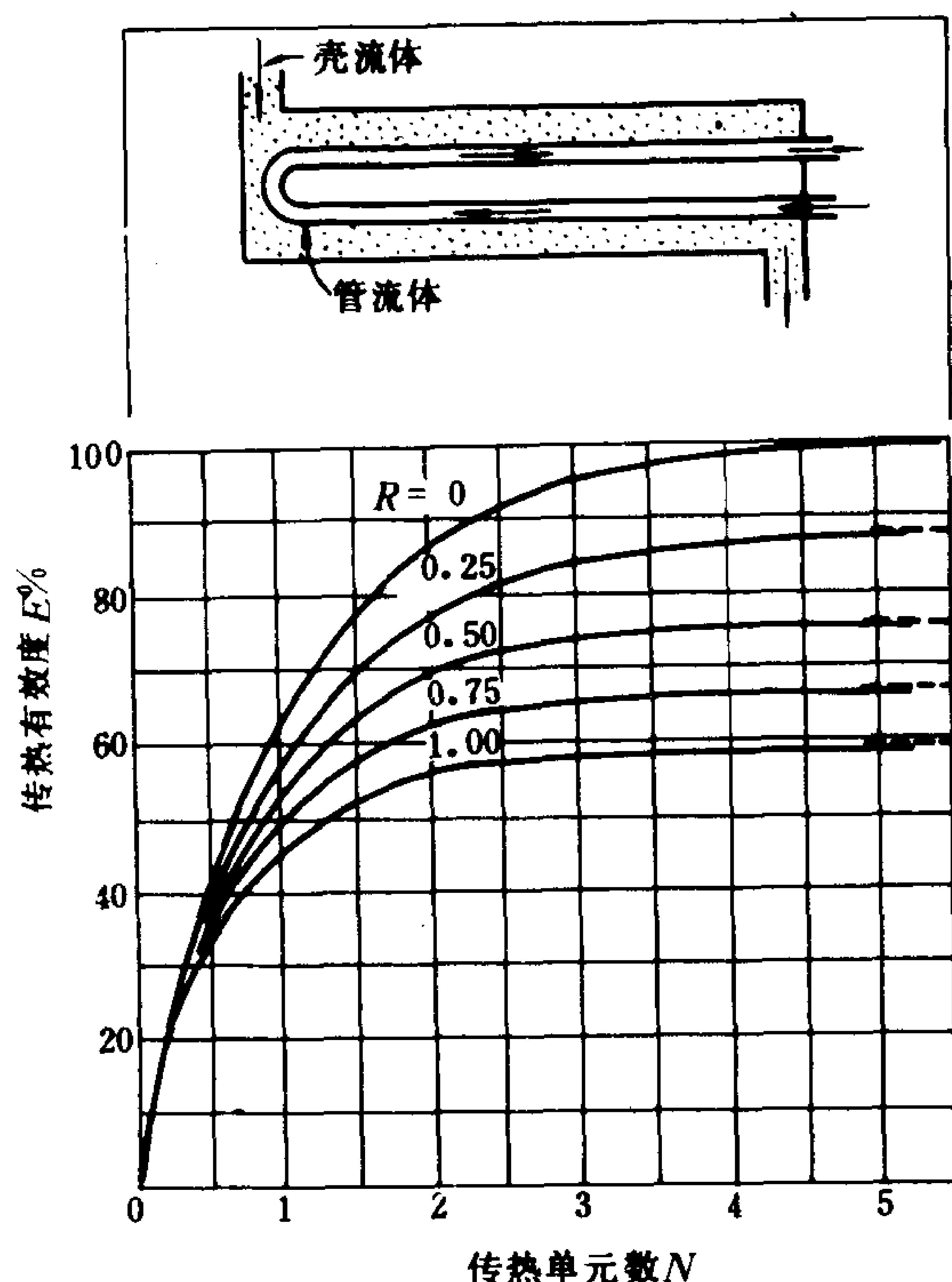


图 1.1.5-29　1～2 次顺逆流式换热器

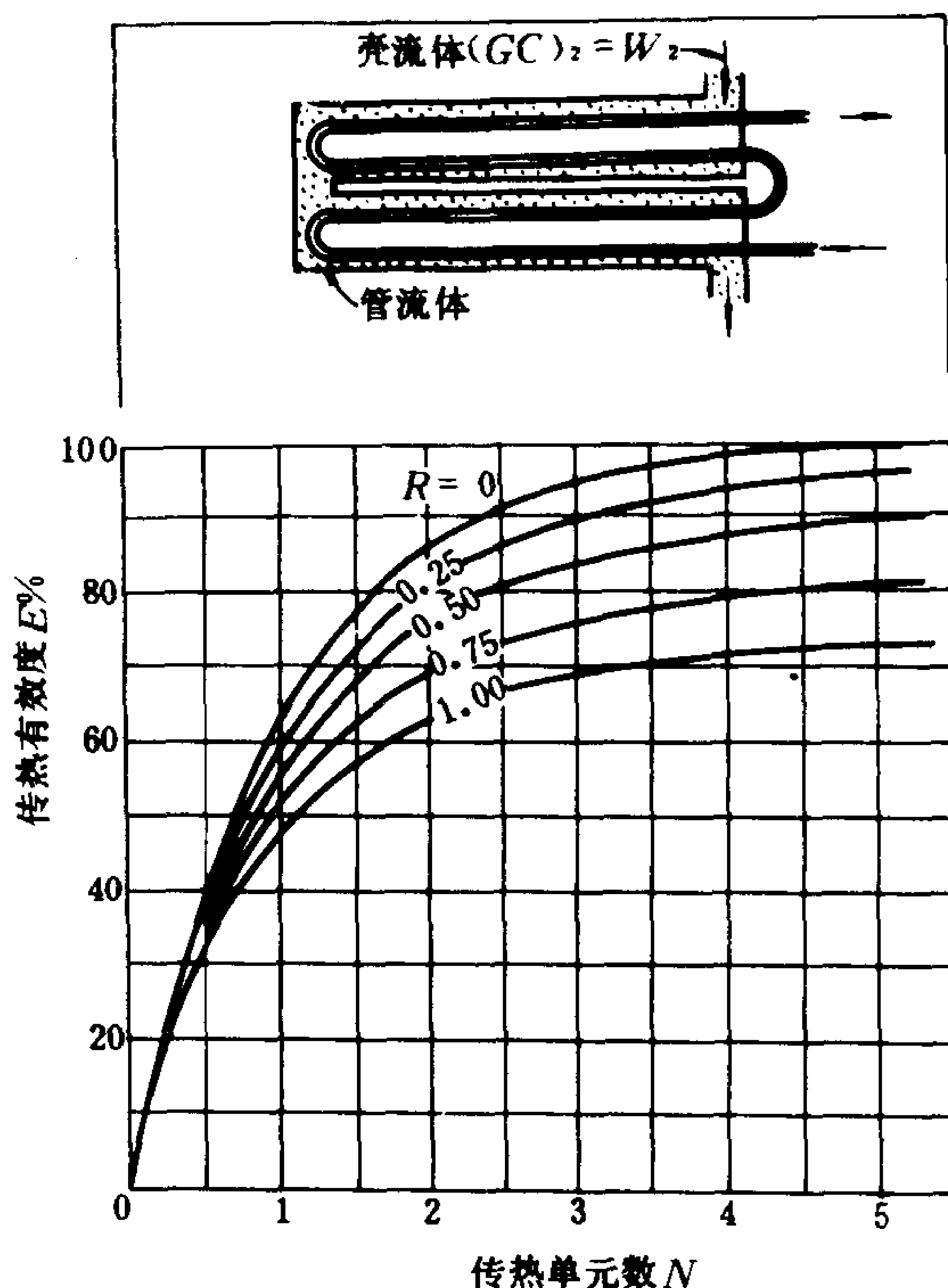


图 1.1.5-30　2～4 次多流程逆流式换热器

所采用的换热器的传热有效度 E 值。

用传热单元数法对表面式换热器进行校核计算的步骤如下：

1)按照换热器的已知结构尺寸计算出总热阻 $1/(kF)$ 值；

2)计算 N 值及 R 值；

3)根据换热器结构及冷热流体的流程查相应的图线，由 N 值及 R 值可求得 E 值；

4)求得传热量 Q 值。

5.6 换热器热计算示例

例 1：采用平均温压法进行设计计算。某船用柴油机改用 20 号重柴油代替轻柴油。在燃油系统中要加一个把 $t_2'=30℃$ 重柴油加热到 $t_2''=70℃$ 的蒸汽加热器。油流量 $\dot{m}_2=1500$ kg/h。干饱和水蒸汽的绝对压力为 $p=0.168$ MPa。加热器为横卧式四流程壳管式换热器，蒸汽在叉排管束外冷凝，油在管内被加热。管束采用外径 $d_0=10$ mm，内径 $d_i=8$ mm的紫铜管。求蒸汽消耗量 m_1、换热面积 F、紫铜管根数以及换热器二管板间距离。

解：

1)重柴油平均温度 $t_2=0.5(t_2'+t_2'')=50℃$

2)按 $t_2=50℃$ 查表 1.1.5-18 用插值法得柴油的物性参数为：

$\rho_2=888.9\ \mathrm{kg/m^3}$，$C_{P_2}=1.944\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，

$\lambda_2=0.125\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$，$\nu_2=9\times10^5\mathrm{m^2/s}$，

$P_{r_2}=1235$

3)重柴油吸热量 $Q=\dot{m}_2C_{P_2}(t_2''-t_2')$

$=1500 \cdot 1.944 \cdot 40=116640\ \mathrm{kJ/h}=32.4\ \mathrm{kW}$

4)蒸汽消耗量 $\dot{m}=\dfrac{Q}{r \cdot \eta}=\dfrac{116640}{2081.3 \cdot 0.95}$

$=58.99\ \mathrm{kg/h}$

式中，r 为 0.618 MPa 水蒸汽的汽化热，查表 1.1.5-16 可得。η为换热器的热利用系数。

5)对数平均温差 Δt

由于热流体为水蒸汽，其对应的饱和温度为 160℃，并在传热面的一侧保持常数。因此交叉流动时的 Δt值与逆流时相同。

$$\Delta t=\frac{70-30}{\ln\dfrac{160-30}{160-70}}=108.7℃$$

6)选取油在管内流速 $W_2=1\ \mathrm{m/s}$。通常油速应在 0.5~1.2 m/s之间。

7)油的流通断面 f_2 和每流程油管根数 n

$$f_2=\frac{\dot{m}_2}{3600 \cdot W_2 \cdot \rho_2}=\frac{1500}{3600 \cdot 1 \cdot 888.9}=0.000468\ \mathrm{m^2}$$

$$n=\frac{f_2}{0.785\ d_i^2}=\frac{0.000468}{0.785 \cdot 0.008^2}=9.31$$

取 $n=10$ 根管子为一个流程，四流程的热交换器要 40 根管子。现按每流程 10 根管子计算出油速。

$$W_2=\frac{1500}{3600 \cdot 10 \cdot 0.785 \cdot 0.008^2 \cdot 888.9}=0.933\ \mathrm{m/s}$$

8)油在管内流动时的换热系数 α_2

按表 1.1.5- 9 管内层流的公式计算。

$$\mathrm{Re}=\frac{W_2 d_i}{\nu_2}=\frac{0.933 \cdot 0.008}{9 \cdot 10^{-5}}=82.93$$

Re<2200 应按层流公式计算。设管长为 1 m，不考虑热流方向的校正。

$$\alpha_2=\frac{\lambda_2}{d_i}1.86\left(\mathrm{Re} \cdot P_r \cdot \frac{l}{d_i}\right)^{1/3}$$

$$=\frac{0.125}{0.008}1.86\ (82.93 \cdot 1235 \cdot 0.008)^{1/3}=271.3\ \mathrm{W/(m^2K)}$$

9)水蒸汽在叉排管束外平均凝结换热系数 α_1

按表 1.1.5-12 水平圆管束公式

$$\alpha_1=0.72\left(\frac{g\rho_L^2 r\lambda_L^3}{\mu_L d(t_s-t_w)}\right)^{1/4} \cdot \varepsilon_n$$

式中，物性参数按液膜平均温度 t_m 查表可得。由于紫铜管热阻很小，壁温 t_w 可取油温 50℃，则 $t_m=0.5\ (160+50)=105℃$。查表 1.1.5-15　$t=100℃$时的物性参数

$\rho_L=958.4\ \mathrm{kg/m^3}$，$\lambda_L=0.683\ \mathrm{W/(m \cdot K)}$，

$\mu_L=282.5 \cdot 10^{-6}\ \ \mathrm{kg/(m \cdot s)}$

$$\alpha_1=0.72\left(\frac{9.81 \cdot 958.4^2 \cdot 2081 \cdot 10^3 \cdot 0.683^3}{282.5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.01 \cdot (160-50)}\right)^{1/4} \cdot \varepsilon_n$$

$$=8476 \cdot \varepsilon_n\ \mathrm{W/(m^2K)}$$

40 根管子布置在圆形管板上叉排排列，共为 8 排，查表 $\varepsilon_n=0.71$

$$\alpha_1=8476\cdot 0.71=6018\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$$

10)传热系数 k_1

略去紫铜管壁的导热热阻，求得以每米管长为基准的传热系数k_L

$$k_1=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1\pi d_0}+\frac{1}{\alpha_2\pi d_i}}=\frac{1}{0.00529+0.14673}$$

$$=\frac{1}{0.15202}=6.578\quad \mathrm{W/(m\cdot K)}$$

11)紫铜管总长 L 及传热面积 F

$$L=\frac{Q}{k_L\cdot \Delta t}=\frac{32400}{6.577\times 108.7}=45.32\ \mathrm{m}$$

$$F=\pi d_0 L=3.14\cdot 0.01\cdot 45.33=1.423\ \mathrm{m^2}$$

12)换热器二管板之间距离

$$S=\frac{L}{4\cdot n}=\frac{45.33}{40}=1.133\ \mathrm{m}$$

例 2：采用图 1.1.5-31 所示的热管换热器来回收锅炉排烟的余热。现对此空气预热器进行校核计算。

带有圆环肋的钢制热管换热器，其结构尺寸为：

管外径 $d_0=28$ mm；管内径 $d_i=24$ mm；环肋外径 $d_f=51$ mm；肋高 $h=(d_f-d_0)/2=11.5$ mm；肋厚$\delta=0.4$ mm；肋片节距 $P=2.3$ mm。

蒸发段长度 $L_e=1.36$ m；冷凝段长度 $L_c=1.36$ m；换热器横向宽度 $H=1.215$ m；深度 $Z=0.286$ m；横向排数 $n=22$；纵向排数 m=6；横向管间节距 $S_1=54$ mm；纵向管距 $S_2=47$ mm，为等边三角形叉排管束。

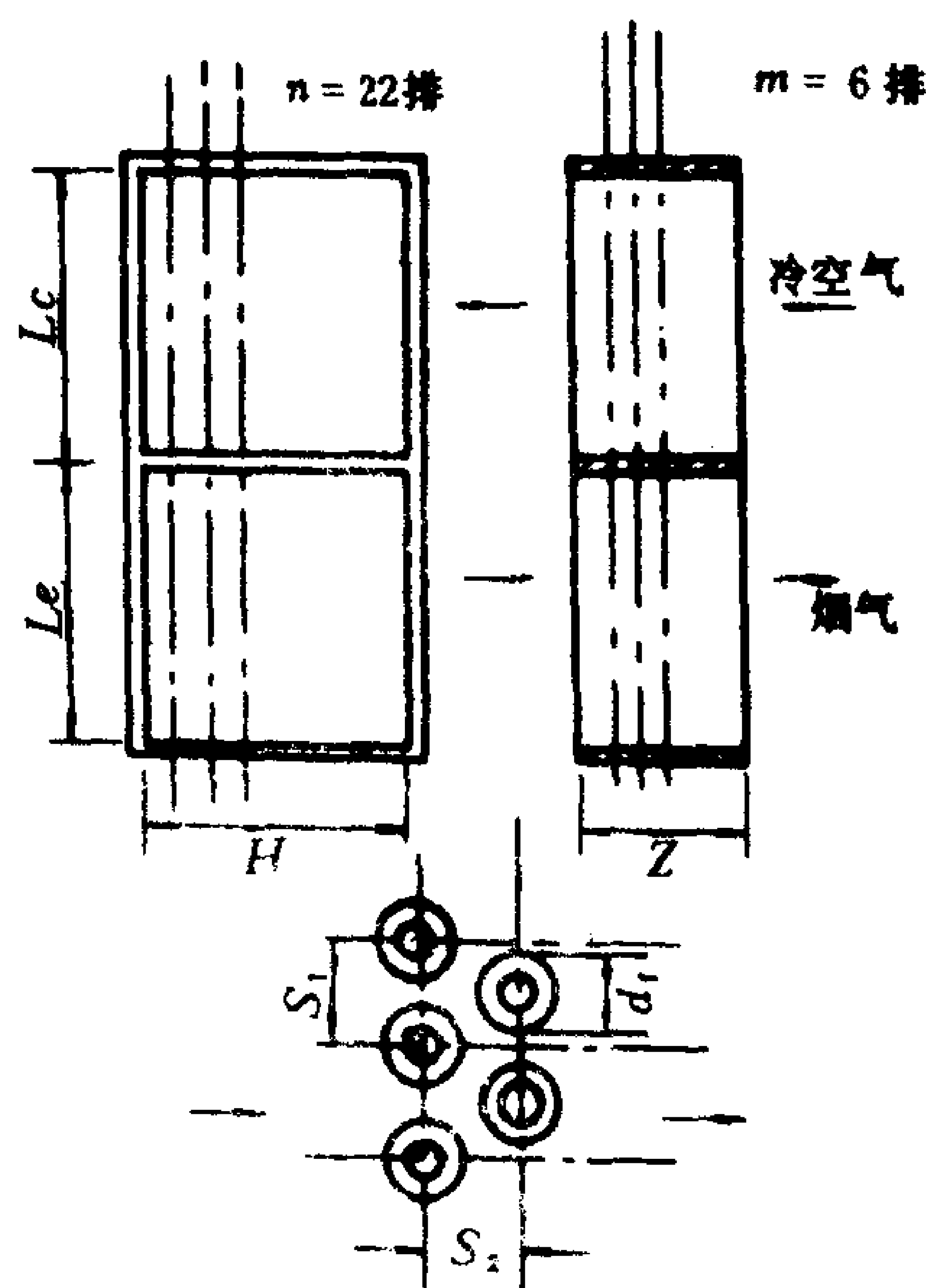


图 1.1.5-31 热管换热器示意图

校核计算所给出的其他数据为：

排烟进口温度 $t_1'=250$℃；

排烟流量 $\dot{m}_1=4.4$ kg/s；

进入换热器空气温度 $t_2'=20$℃；

空气流量 $\dot{m}_2=4$ kg/s；

校核计算应求得下列数据：

1)空气加热后的温度 t_2''；

2)排烟余热利用后的排出温度 t_1''；

3)余热回收量 Q；

4)回收余热所折合的标准油量 G。

解

用传热单元数法进行校核计算，其计算步骤为：按表 1.1.5-24 进行热管的各分热值计算，因此应求出带环肋一侧的蒸发段面积 $F_{e,o}$及冷凝段面积 $F_{c,o}$。

$$F_{e,o}=F_{c,o}=\frac{2\pi(d_f^2-d_0^2)}{4}\left(\frac{1}{P}-1\right)L_e+\pi d_0(P-\delta)\left(\frac{1}{P}-1\right)L_e=1.238\times 1.36$$

$+0.072\times1.36=1.27\ m^2$

求出蒸发段和冷凝段管束中流道的最小截面积

$$F_{min}=L_e\cdot H-[d_0\ (p-\delta)\ +\delta d_f]\ \frac{L_e\cdot n}{P}$$

$$=1.36\times1.215-[0.028\times0.0019+0.0004\times0.051]\times\frac{1.36\times22}{0.023}=0.69\ m^2$$

由于 t_1''及 t_2''皆为未知值，无法得知冷热流体的平均温度，致使各物性参数 μ、λ、P_r 值无法确定而求不出排烟侧和空气侧的换热系数 α_e及α_c，因此要设定 t_1''及 t_2'' 值。最后当校核设计时求出的 t_1''及 t_2''值与原设定值偏差不大时，才认为计算正确。通常要用二至三次逐次逼近计算。计算步骤及结果列于表 1.1.5-30。

表 1.1.5-30　　热管换热器计算表

序	计算步骤	计算结果		备注
		空气侧	烟气侧	
1	估算冷热流体出口温度 t_1''及 t_2''，必须满足 $\dot{m}_1C_{p1}(t_1'-t_1'')=\dot{m}_2C_{p2}(t_2''-t_2')$	145.57	145	取烟气侧烟气 200℃的比热值 $C_p=1.097$ kJ/ (kg·K)；空气 77℃的比热值 $C_p=1.009$ kJ/ (kg·K)。
2	气体平均温度 $t'=(t'+t'')/2$	82.76	197.5	
3	气体动力粘度 μ，kg/(m·s)	2.08×10^{-5}	2.45×10^{-5}	查表 1.1.5-13 及表 1.1.5-14
4	气体导热系数 λ W/(m·K)	30×10^{-3}	40.1×10^{-3}	
5	气体 P_r数	0.7	0.67	
6	质量流速 $G=\frac{\dot{m}}{F_{min}}$	5.79	6.37	
7	气体 R_e数 $R_e=\frac{Gd_0}{\mu}$	7794	7280	$R_e=\frac{Wd_0}{\nu}=\frac{Gd_0}{\mu}$
8	气体 N_u 数 $N_u=0.134R_e^{0.681}\cdot P_r^{0.33}\cdot\left(\frac{p-\delta}{h}\right)^{0.2}\cdot\left(\frac{p-\delta}{\delta}\right)^{0.1134}$	44.2	41.6	表 1.1.5-10 No. 6 公式
9	换热系数 $\alpha_e=Nu_e\frac{\lambda_e}{d_0}$ $\alpha_c=Nu_c\frac{\lambda_c}{d_0}$ W/ (m²·℃)	47.3	59.5	烟气侧为蒸发段角标用 e；空气侧角标用 C。
10	求肋效率须知的 $mh=\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda\delta}}\cdot h$	0.742	0.83	查表 1.1.5-1 碳钢在 400 k 时$\lambda=56.7$
11	肋效率　$\eta_{f.e}$及$\eta_{f.c}$	0.80	0.78	查表 1.1.5-7 No. 3 并知 $d_f/d_0=1.82$
12	求肋壁总效率 $\eta_{t.e}=\frac{F_r}{F_{eo}}+\frac{F_f}{F_{e,o}}\eta_{f.e}$ $\eta_{t.c}=\frac{F_r}{F_{c,o}}+\frac{F_f}{F_{c,o}}\eta_{f.c}$	0.81	0.791	按式 (1.1.5-45)，F_r——肋根管壁面积；F_f——肋壁面积。
13	流体与热管肋壁间的热阻 $r_1=\frac{1}{\alpha_cF_{c,o}\eta_{t,c}}$ $r_6=\frac{1}{\alpha_eF_{e,o}\eta_{t,e}}$	0.0146	0.0119	见表 1.1.5-26 中的各热阻计算式
14	热管壁热阻 $r_2=r_5=\frac{\ln(d_0/d_i)}{2\pi\lambda L}$	0.000318	0.000318	

续上表

序	计 算 步 骤	计 算 结 果	备 注
15	热管内壁对工质的热阻 $r_3=\frac{1}{F_{ci}\alpha_{c,i}}$ $r_4=\frac{1}{F_{ei}\cdot\alpha_{ei}}$	0.00196 　　 0.00196	$\alpha_{c,i}=5000$ W/(m²K); $\alpha_{ei}\approx5000$ W/(m²·K) $F_{c,i}=F_{ei}=\pi d_i l_e=0.102$ m²
16	每根热管总热阻 $r=r_1+r_2+r_3+r_4+r_5+r_6$	0.031	
17	热管换热器总热阻 $\frac{1}{kF_{e,0}}=\frac{r}{n\cdot m}$ W/K	2.348×10^{-4}	k为以$F_{e,0}$面积为基础的换热器传热系数，$F_{e,0}$为蒸发段外侧总面积；$m\cdot n$为热管总根数132。
18	热容量比 $R=\frac{\dot{m}_2C_{p2}}{\dot{m}_1C_{p1}}$	0.836	
19	传热单元数 $N=\frac{kF_{e,0}}{\dot{m}_2C_{p2}}$	1.055	
20	按逆流热交换器的 E-N 线图求出 E 值	0.52	查图 1.1.5-26
21	烟气出口温度 $t_1''=t_1'-E(t_1'-t_2')$	130.4	
22	空气出口温度 $t_2''=t_2'+\frac{1}{R}(t_1'-t_1'')$	163	
23	热管换热器传热量，按烟气放热计 $Q=\dot{m}_1C_{P1}(t_1'-t_1'')$ kW	577.28	
	按空气吸热计 $Q=\dot{m}_2C_{P2}(t_2'-t_2'')$ kW	577.148	
24	每昼夜回收的余热折合标准燃油量 kg 数为 $G=\frac{Q\times24\times3600}{41868}$kg	1191	按 1 kg燃油的发热值为41868 kJ计

参考文献

〔1〕钱滨江等编：简明传热手册，高等教育出版社，1984

〔2〕马庆芳等编：实用热物理性质手册，中国农业机械出版社，1986

〔3〕章熙民等编：传热学（第二版），中国建筑工业出版社，1985

〔4〕王补宣主编：热工基础（第四版），人民教育出版社 1981

〔5〕机械工程手册编委会编：机械工程手册、第二卷、第六篇、热工学，机械工业出版社，1982

〔6〕米海也夫著，王补宣译：传热学基础，高等教育出版社，1954

〔7〕埋桥英夫：空调用热交换器の热传達特性，日立评论，1969 年 No5

〔8〕彦启森主编：空气调节与制冷技术，中国建筑工业出版社，1983

〔9〕潘延龄 舒宏纪主编：工程热力学和传热学，人民交通出版社，1982

第 6 章 燃 烧 学

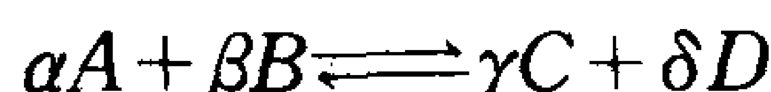
1 燃烧的基本概念

燃烧是一种剧烈的化学反应；反应速度用单位时间和单位体积内烧掉的燃料量或消耗掉的氧量来表示。

1.1 影响燃烧速度的主要化学规律

1.1.1 质量作用定律

若 A、B、C、D 四种物质进行下述可逆反应：



$$\alpha A+\beta B \rightleftharpoons \gamma C+\delta D$$

则在一定温度下，正反应速度为 $W_1=k_1[A]^{\alpha}[B]^{\beta}$，逆反应速度为 $W_2=k_2[C]^{\gamma}[D]^{\delta}$。$k_1$, k_2分别为正、逆反应常数，$[A]$、$[B]$、$[C]$、$[D]$依次为 A、B、C、D 四种物质的容积浓度。

当正、逆反应平衡时，$W_1=W_2$，则

$$k_1[A]^{\alpha}[B]^{\beta}=k_2[C]^{\gamma}[D]^{\delta}$$

$$k_C=\frac{k_1}{k_2}=\frac{[C]^{\gamma}[D]^{\delta}}{[A]^{\alpha}[B]^{\beta}} \quad (1.1.6\text{-}1)$$

k_C 为该已知温度下的平衡常数。

若反应前后的物质均为气相，则可用参与反应气体的分压力 P_A、P_B、P_C、P_D 来表示平衡常数：

$$k_P=\frac{P_C^{\gamma}\cdot P_D^{\delta}}{P_A^{\alpha}\cdot P_B^{\beta}} \quad (1.1.6\text{-}2)$$

k_P 为用气体分压力表示的平衡常数，它与 k_C 的关系为：

$$k_P=k_C\ (RT)^{\gamma+\delta-\alpha-\beta} \quad (1.1.6\text{-}3)$$

式中，R 为气体常数，T 为反应温度 K，$\gamma+\delta-\alpha-\beta$ 为化学反应中分子增加数。

平衡常数与温度的关系：

定压反应时：$$\frac{d\ln k_P}{dT}=-\frac{Q_P}{RT^2} \quad (1.1.6\text{-}4)$$

定容反应时：$$\frac{d\ln k_C}{dT}=-\frac{Q_V}{RT^2} \quad (1.1.6\text{-}5)$$

式中，Q_P、Q_V 分别为定压和定容反应中释放或吸收的热量；当 $Q>0$ 时，为放热反应，温度增加使平衡常数减小；当 $Q<0$ 时，为吸热反应，温度增加使平衡常数增大。

1.1.2 阿伦尼乌斯定律

在浓度一定时，化学反应常数与温度的关系为：

$$k=k_0\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1.1.6\text{-}6)$$

式中，k_0为频率因子；E 为活化能，可由实验测定，其单位是：kJ/mol （千焦/摩尔）。

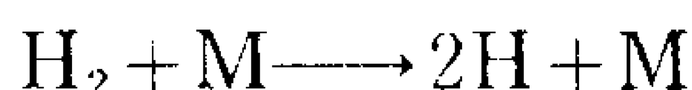
产生化学反应必须破坏反应物质原有分子结构，使分子活化，结合成新分子。实际上只

有少数能量较大的分子相互碰撞后才能起到这种作用，这种碰撞称为有效碰撞。活化能就是破坏反应物分子的原子键，使之达到有效碰撞所必须的最小能量。

1.1.3 连锁反应

几乎所有的燃烧反应都不是简单地服从质量作用定律和阿伦尼乌斯定律，而是进行连锁反应。连锁反应的速度很快，首先由某些高能分子激化，然后通过一系列中间反应，使反应自动进行下去。连锁反应分两种：不分枝连锁反应和分枝连锁反应。燃烧多半是分枝连锁反应。下面以氢的燃烧为例说明连锁反应机理：

1）氢分子与高能分子碰撞生成活化中心



$$H_2+M \longrightarrow 2H+M$$

式中，M 为高能分子。

2）氢原子和氧分子的反应



$$H+O_2 \longrightarrow O+OH$$

3）氧原子和氢氧根引起的反应



$$O+H_2 \longrightarrow H+OH$$



$$OH+H_2 \longrightarrow H_2O+H$$

4）总反应



$$H+3H_2+O_2 \longrightarrow 3H+2H_2O$$

H、O 和OH 都是活化中心，只需要较小的活化能就能发生化学反应。从总反应中可以看出，一个氢原子参加反应后其本身消失了，但反应结果产生了 3 个氢原子；这 3 个氢原子参加反应，将产生 9 个氢原子；这样随着反应的进行，氢原子数目不断增多，因此反应不断加速。反应过程中活化中心不断增加是分枝连锁反应的特征。应当注意的是，在活化中心形成的同时还可能有链的中断。当两个原子和一个中性分子碰撞而重新结合时，其能量传给中性分子；同样两个原子在器壁上相撞而结合，把能量传给器壁。这些效应都使活化原子数目减少，当活化中心增长的速度小于消失的速度时会导致链的中断。

1.2 着火

燃烧前，燃料必须预先着火，着火时，燃料的化学反应速度还不足以产生光和火焰。着火又分为热力着火和连锁着火。

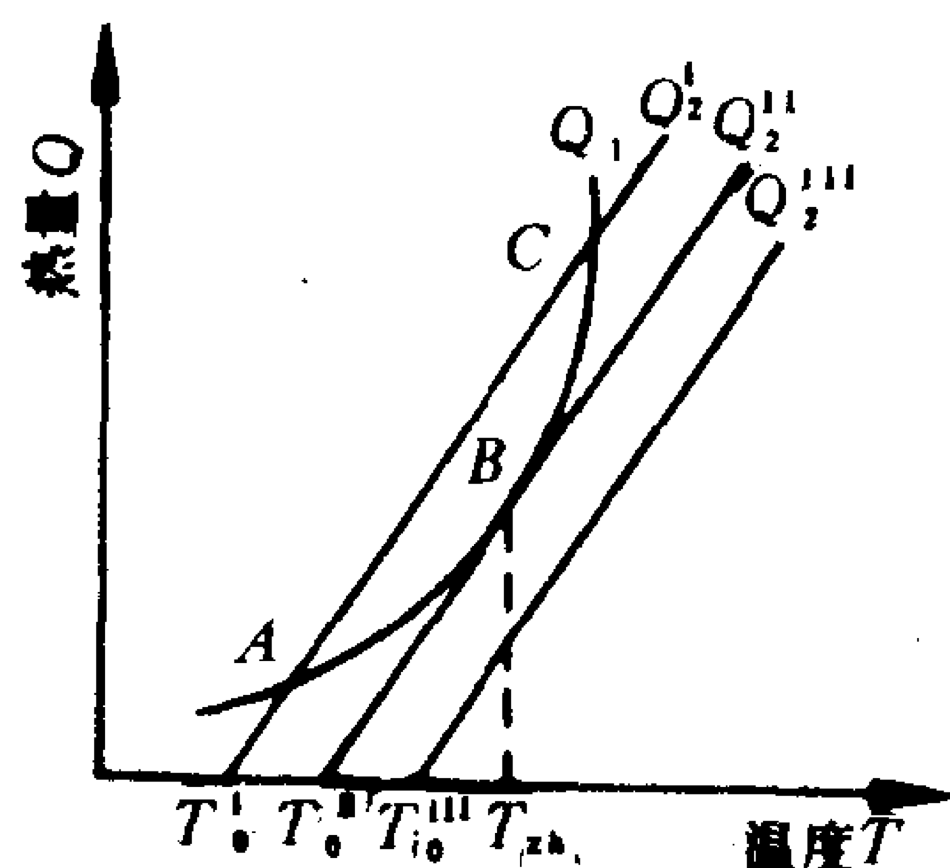


图1.1.6-1 着火热力工况

燃料在化学反应时释放出热量，部分热量散失到外界，另一部分热量则在燃料内部积蓄起来，使放热反应的温度升高，从而使反应速度加快，放热量增加；随着上述过程的发展和强化，在放热量超过散热量时，就使燃料着火。这种与热力工况有关的着火称为热力着火。

若容器内可燃气体混合物的成分、温度和压力是均匀的，即为零元系统，则其燃烧放热量，即产热为：

$$Q_1=K_0C^n\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)VQ \qquad (1.1.6\text{-}7)$$

式中，C 为可燃混合物中反应物的浓度，n 为反应级数，V 为容器体积，Q 为可燃混合物的反应热，即发热量。

容器的散热为：

$$Q_2 = \eta S\ (T - T_0) \tag{1.1.6-8}$$

式中，η 为散热系数，S 为容器壁面面积，T_0 为容器壁面的温度。

图 1.1.6-1 表示着火热力工况，Q_1为放热曲线，Q_2为散热直线。由 Q_2^{I}、Q_2^{II}、Q_2^{III} 表示 3 种工况，当初温为 T_0^{I}时，$Q_2 > Q_1$不能着火；当初温为 T_0^{III}时，$Q_1 > Q_2$有剩余热量可自动着火；当初温为T_0^{II}时，Q_1与Q_2^{II}曲线相切，在温度T_{zh}时，$Q_1 = Q_2$达到不稳平衡的临界状态，定义 T_0^{II}为自燃温度，T_{zh}为着火温度，其关系为：

$$T_{zh} = T_0^{\mathrm{II}} + \frac{R\ {T_0^{\mathrm{II}}}^2}{E} \tag{1.1.6-9}$$

但是着火温度并不是由燃料的活性所决定的物理常数，而是随实际条件变化的。表 1.1.6-1列出了某些燃料的着火温度。

表 1.1.6-1　　在大气压下某些燃料在空气中的着火温度

可燃物	分子式	着火温度 ℃	可燃物	分子式	着火温度 ℃
氢	H_2	530～590	硫化氢	H_2S	290～487
一氧化碳	CO	610～658	乙烯	C_2H_4	490～550
甲烷	CH_4	645～850	丙烯	C_3H_6	458
乙烷	C_2H_6	530～594	丁烯	C_4H_8	443
丙烷	C_3H_8	530～588	煤油		270～320
丁烷	C_4H_{10}	490～569	汽油		410～560
己烷	C_6H_{14}	300～630	石油		360～400
辛烷	C_8H_{18}	275	重油		336
乙炔	C_2H_2	335～500	褐煤		450
苯	C_6H_6	720～770	天然气		530
甲苯	$C_6H_5CH_3$	660			

在很多情况下，由于活化中心的繁殖超过了销毁，即使温度不变，反应速度也会迅速增大而导致着火。这种由连锁反应引起的着火称为连锁着火。ϕ 表示连锁反应分枝速度常数，f 和 g 分别为由于分枝链生成新的活化中心的常数和链中断反应的常数，$\phi = f - g$。在图 1.1.6-2 中，$\phi > 0$ 时链成长速度不断加速，能够自燃，高温时可能产生爆炸。$\phi < 0$ 时断链作用占优势，反应速度达到 W_0不能再增加，不能发生自燃。$\phi = 0$ 时链的中断和成长速度相等，反应速度按直线关系变化，此临界状态相应的温度定义为自燃温度。温度和压力的改变将使 ϕ 改变。

尽管连锁着火和热着火的性质不同，但二者之间有密切的联系。如在柴油机气缸中的着

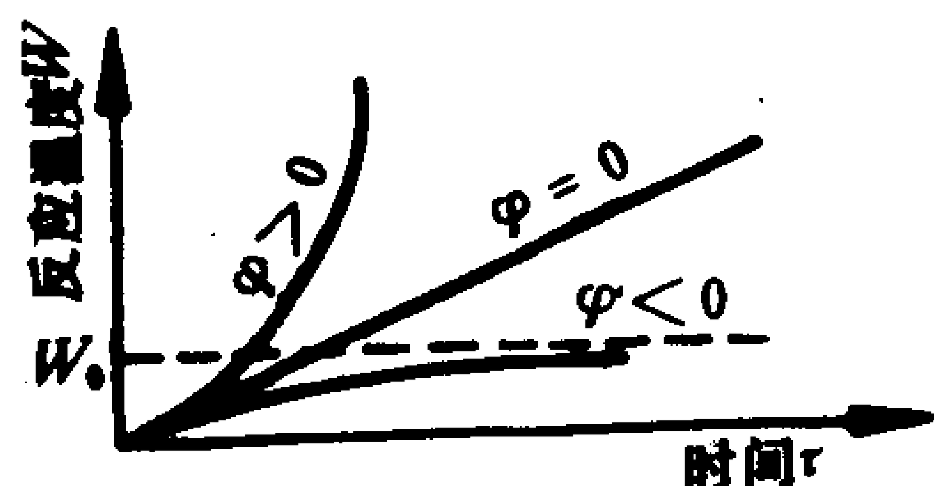


图 1.1.6-2　链锁着火反应

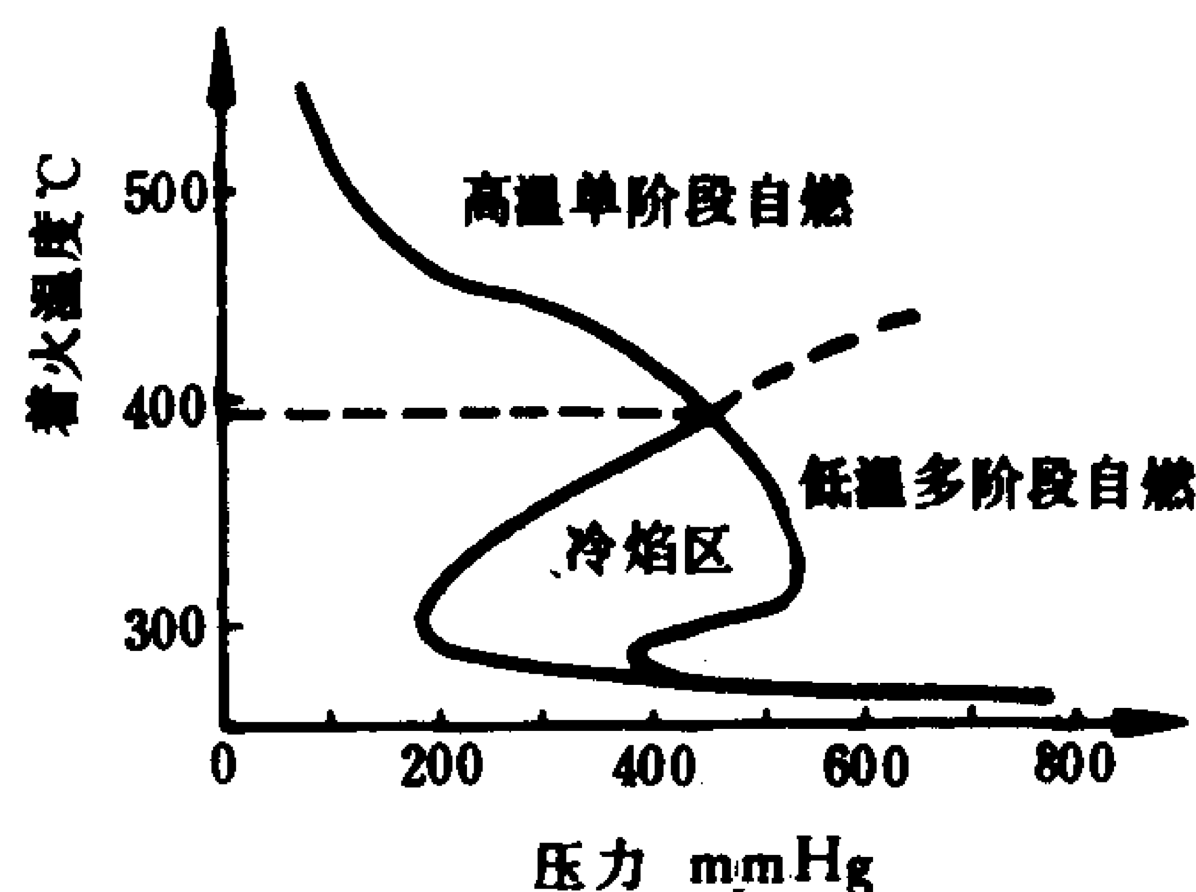


图 1.1.6-3　丙烷氧气混合物的冷火焰

火过程就是二者的结合，以连锁反应为先期反应，随着反应过程中热量的积累，使温度和压力不断提高，过程得到强化，最终引起燃烧。由冷火焰、蓝火焰过渡到热火焰的着火过程称为连锁热力着火或低温多阶段自燃。图 1.1.6-3 表示出这一过程。表 1.1.6-2 列出了几种液体燃料的实验数据。

表 1.1.6-2　　几种燃料的链锁热力自燃温度

燃料	温度 ℃	
	冷火焰的出现	热火焰的出现
航空煤油	200	415
原油	250	400
乙醇	310	465
煤油	245	320
重油	255	380

1.3 点火

点火主要有三种形式：炽热物体点火，电火花点火和火焰点火。目前还未建立起严格定量的点火理论。

实验指出用点火棒点燃丁烷空气混合物，过剩空气系数 $\alpha>1$ 比 $\alpha<1$ 时容易点燃；在通常情况下，缓慢运动的混合物比停滞不动的混合物容易点燃。点火棒具有较高温度时才能点燃快速运动的和低压的混合物。参见图 1.1.6-4。。

可燃气体混合物通过炽热平板时，着火距离和混合物速度的关系以及着火距离和板温的关系由图 1.1.6-5 和图 1.1.6-6 示出。

电火花点燃可燃气体混合物时，压力和氧气的浓度增加时，所需要的最小能量 H_{min} 减小。在与空气混合时，当 $\alpha\approx 1$ 时，所需要的点燃能量最小。在与氧气混合时，H_{min} 出现在 $\alpha<1$ 的情况下。而且燃料与空气混合时的 H_{min} 大于与纯氧混合时的 H_{min}。在紊流条件下 H_{min} 增大。

静止混合气体中电火花点燃的最小能量 H_{min} 的半经验公式：

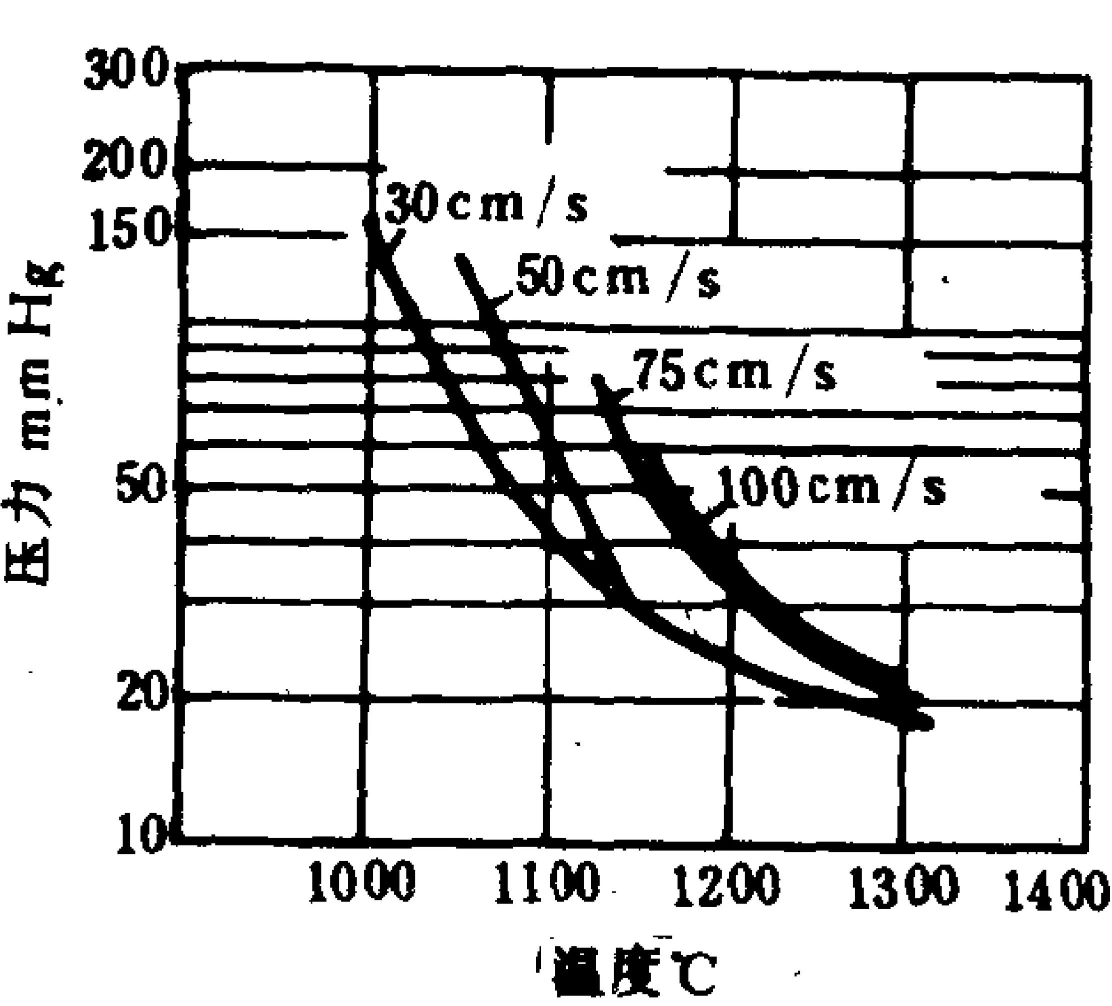


图 1.1.6-4　点燃不同压力及流速下的丙烷空气混合物时 Ni－Cr 丝的最低温度

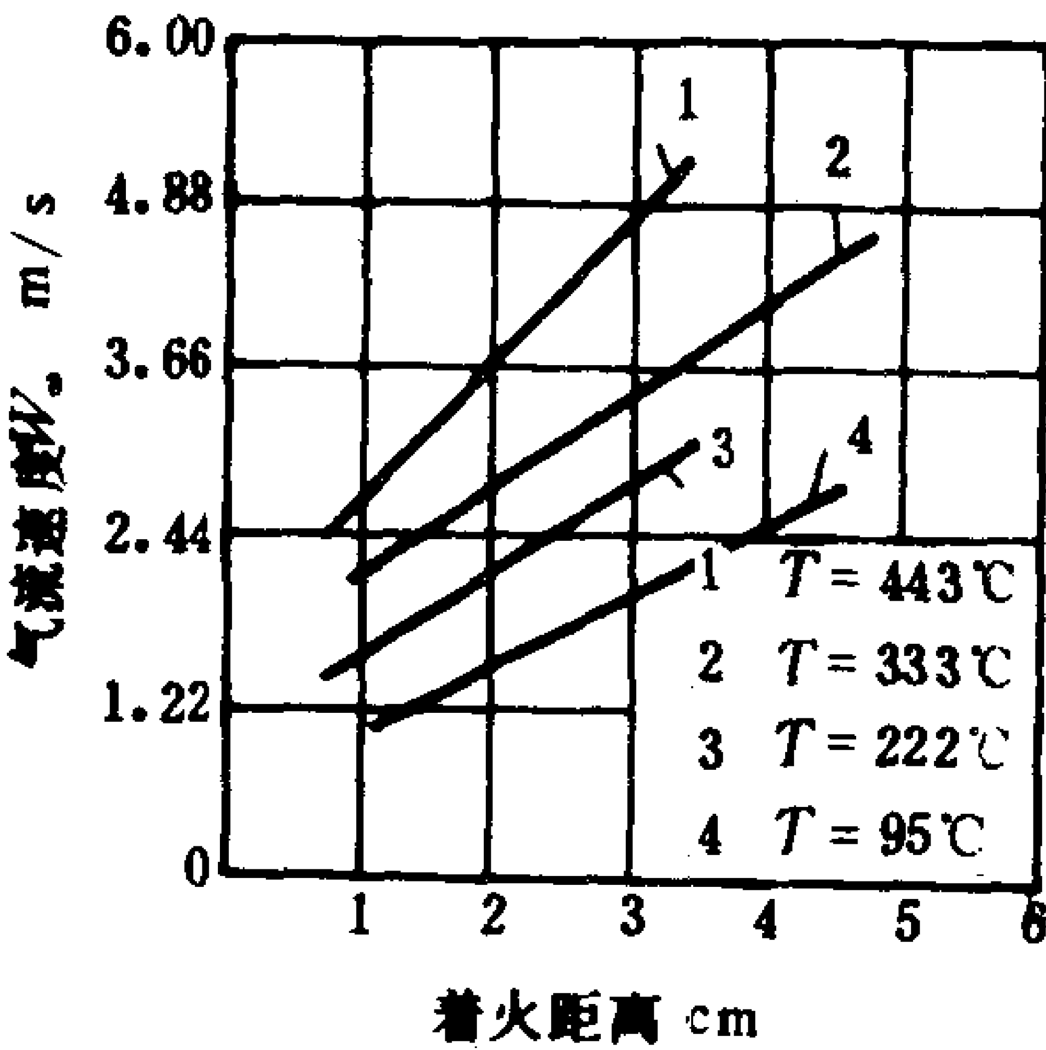


图 1.1.6-5　酒精空气混合气体的速度和炽热平板着火距离的关系

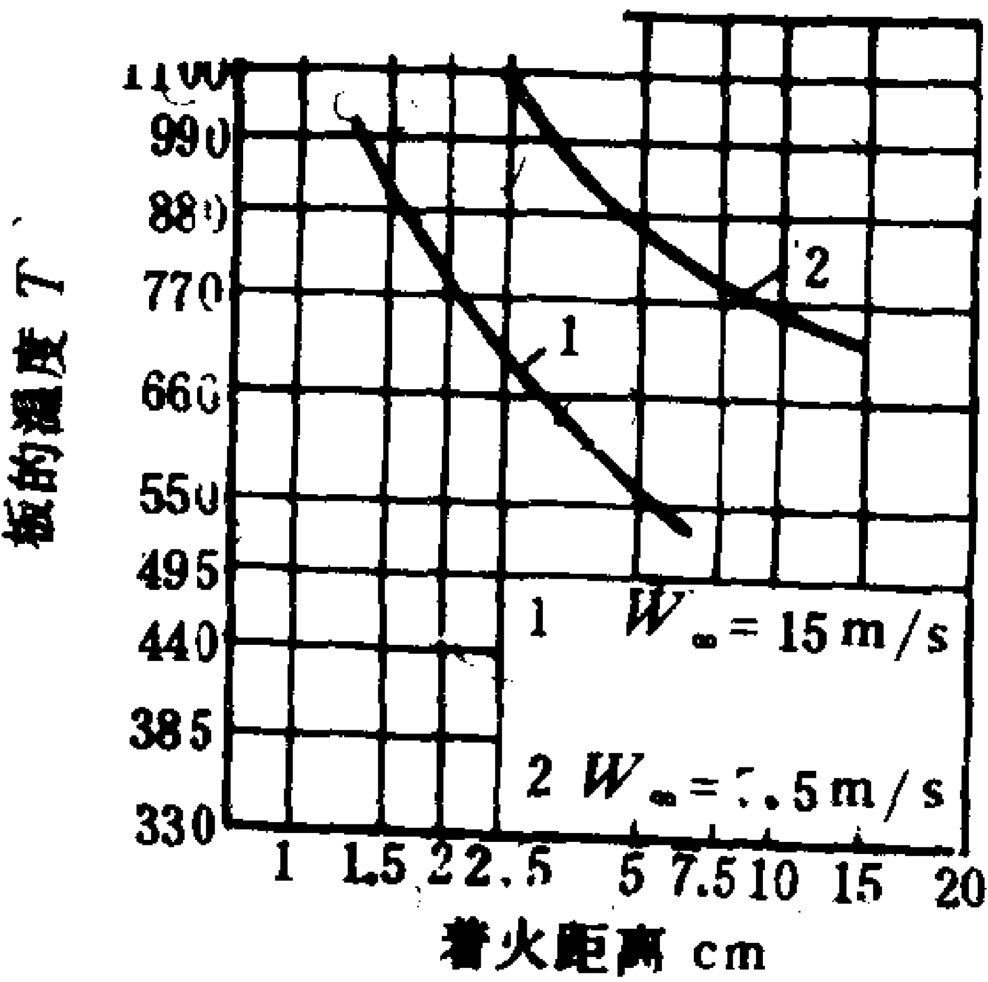


图 1.1.6-6　丙烷空气混合物（$\alpha=1$）的着火距离和板温的关系

$$H_{min}=k_1\frac{4}{3}\pi\gamma_{min}^3 C_P\rho(T_m-T_\infty)$$

$$r_{min}=\left[\frac{3\lambda(T_m-T_\infty)e^{\frac{E}{RT_m}}}{Ck_0Q_F\rho^2 f_F f_{ox}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (1.1.6\text{-}10)$$

式中，k_1为修正系数，C_p为定压比热，T_m为混合气的理论燃烧温度，T_∞为新鲜混合气的初温，Q_F为燃料的发热量，f_F和f_{ox}分别为燃料和氧的初始质量相对浓度，k_0为反应频率因子，r_{min}为最小火球半径，λ为导热系数，C为某一常数。

流动混合气体中电火花点燃所需能量E的半经验公式，对层流：

$$\frac{W_\infty\theta}{pE}=C+\ln\frac{2W_\infty\theta+d}{d} \qquad (1.1.6\text{-}11)$$

对紊流：

$$\frac{E}{W_\infty\theta}\ln\frac{2W_\infty\theta+d}{d}=f(u') \qquad (1.1.6\text{-}12)$$

式中，W_∞为气体流动速度，θ为放电时间，d为电极间距离，u'为紊流脉动速度。实验证明$f(u')$是个简单的线性函数。

火焰点火是用热燃烧产物点燃混合气体。实验证明热气流温度，混合气体的过剩空气系数，流速和其性质对点燃过程均有影响。

1.4 气体燃料的燃烧

气体燃料的燃烧分为预混燃烧和扩散燃烧。可燃气体与空气或氧气预先混合之后的燃烧为预混燃烧。可燃气体与氧气边混合边燃烧，氧的扩散对燃烧起控制作用，这种燃烧称为扩散燃烧。预混火焰与扩散火焰相比，其长度容易控制，不易产生炭黑，燃烧完全，温度较高。但是扩散火焰长，并且均匀。

以上两种燃烧又分为层流燃烧和紊流燃烧。均匀混合物在局部着火燃烧时，会将释放的热量传递给邻近层，使火一层一层地传播下去。火焰在其锋面法线方向向未燃烧气体传递的速度称为火焰传播速度W_n，它是单位时间内单位火焰面积上烧掉的气体体积，也称为燃烧速度。

预混可燃气体处于层流状态时，燃烧释热传递主要靠导热，这时的火焰传播速度称为正常火焰传播速度W_n。

$$W_n=\sqrt{\frac{a}{\rho C_p}\cdot\frac{2Q}{(T_{1r}-T_0)^2}\int_{T_{1r}-\frac{RT_{1r}^2}{E}}^{T_{1r}}W_m\,dT} \qquad (1.1.6\text{-}13)$$

$$a=\frac{\lambda}{\rho C_p}$$

式中，a为导温系数；W_m为反应速度，它是影响火焰传播速度的主要因素；Q为可燃混合物的反应热；T_0为初温，T_{1r}为理论燃烧温度。

预混可燃气处于紊流燃烧时，火焰传播速度W_T增加；当混合长度明显小于火焰锋面厚度，雷诺数Re=2300～5000时，即小尺度湍动时，火焰的传播速度W_T近似满足如下关系：

$$\frac{W_T}{W_n}\propto\sqrt{Re} \qquad (1.1.6\text{-}14)$$

对大尺度湍动，火焰表面积增大，火焰传播速度进一步增加，其关系为：

$$W_T \approx 4.3 \frac{W'}{\sqrt{\ln\left(1+\frac{W'}{W_n}\right)}} \tag{1.1.6-15}$$

式中，W' 为湍流的脉动速度。

可燃气体的浓度对 W_n 有显著的影响，存在着浓度上限和下限，在上、下限之外火焰不能传播。表 1.1.6-3 列出几种气体的着火浓度极限。

表 1.1.6-3　在室温和大气压下空气中可燃气体着火浓度极限

可燃气体	燃气容积百分数 %		可燃气体	燃气容积百分数 %		可燃气体	燃气容积百分数 %	
	下　限	上　限		下　限	上　限		下　限	上　限
CH_4	5.3	15.0	C_2H_4	3.1	32.0	C_7H_8	1.4	6.7
C_2H_6	3.0	12.5	C_3H_6	2.4	10.3	H_2	4.0	75.0
C_3H_8	2.2	9.5	C_4H_8	1.6	9.3	CO	12.5	74.0
C_4H_{10}	1.9	8.5	C_5H_{10}	1.5	8.7	H_2S	4.3	45.0
C_5H_{12}	1.5	7.8	C_2H_2	2.5	8.0			
C_6H_{14}	1.2	7.5	C_6H_6	1.4	7.1			

混合可燃气体着火上、下限 L 的估算公式：

$$L = \frac{100}{\frac{a}{A}+\frac{b}{B}+\frac{c}{C}+\cdots} \tag{1.1.6-16}$$

式中，a、b、c 为混合气体中各组分的容积百分数%，A、B、C为混合气体中各组分的着火容积浓度上限或下限。$a+b+c+\cdots=100\%$。

在上、下限之间，W_n 有一个最大值（W_n）$_{max}$，表 1.1.6-4 列出了部分气体与空气混合物的（W_n）$_{max}$。

初始温度升高，（W_n）$_{max}$ 增大，如图 1.1.6-7 所示。

可燃气体与氧气混合物的着火浓度极限比与空气混合物的大。表 1.1.6-5 表示出可燃气体与氧混合时，下限基本不变，但上限增加很多。

表 1.1.6-4　可燃气体与空气混合物的（W_n）$_{max}$

可　燃　气　体	H_2	CO	CH_4	C_2H_2	C_2H_4
$(W_n)_{max}$ 时混合物中可燃气容积%	42.0	43.0	10.5	10.0	7.0
最大正常火焰传播速度（W_n）$_{max}$ cm/s	267.0	41.5	37.0	135.0	63.0

表 1.1.6-5　在室温和大气压力下可燃气与氧混合时着火浓度极限

可　燃　气　体	H_2	CO	C_2H_4	CH_4
在氧气中可燃气容积　%	4.0~94.0	15.5~94.0	3.0~80.0	5.1~60.0

表 1.1.6-6　燃油爆炸极限

液　体　燃　料	汽　油	煤　油	重　油	原　油
爆炸极限容积　%	1.0~6.0	1.4~7.5	1.2~6.0	1.7~11.3

为了强化燃烧，工业上多用紊流燃烧，紊流燃烧主要靠分子团的不规则运动传递热量，因此热交换强化，火焰传播速度增大。在强烈的紊流条件下，火焰面完全破裂，从而增大了火焰表面积，使燃烧速度增加。

扩散燃烧分为层流扩散燃烧和紊流扩散燃烧，参见图 1.1.6-8。

层流扩散燃烧火焰的前锋面薄，火焰长度 L_{hy} 近似满足下述关系：

$$L_{hy} \propto \frac{Wd^2}{D}$$

式中，D 为分子扩散系数，W 为可燃气体的流速，d 为喷嘴直径。

紊流扩散燃烧的火焰长度为：

$$L_{hy}=\frac{R_0}{a}\left[0.70\left(1+n\right)-0.29\right] \qquad (1.1.6\text{-}17)$$

式中，R_0 为射流喷嘴半径，a 为紊流结构系数，n 为空气和可燃气体的化学当量比。

可燃气体燃烧时，若气流速度大于火焰的传播速度，则火焰被吹熄，称为脱火。若在喷嘴附近的气体局部速度小于火焰的传播速度，火焰就会逆窜回喷嘴之中，称为回火。所以可燃气体的速度控制在一定范围内，才能保证既不脱火，也不回火，使火焰稳定。这个范围称为稳定极限。稳定极限与可燃气体的物理化学性质、压力、气流流态有关。图 1.1.6-9 是丁烷空气混合物在紊流时的稳定极限。气体可燃物或煤粉气流可用喷嘴出口处的钝体或旋流器所形成的热烟气回流来维持火焰的稳定。图 1.1.6-10 表示钝体回流作用。

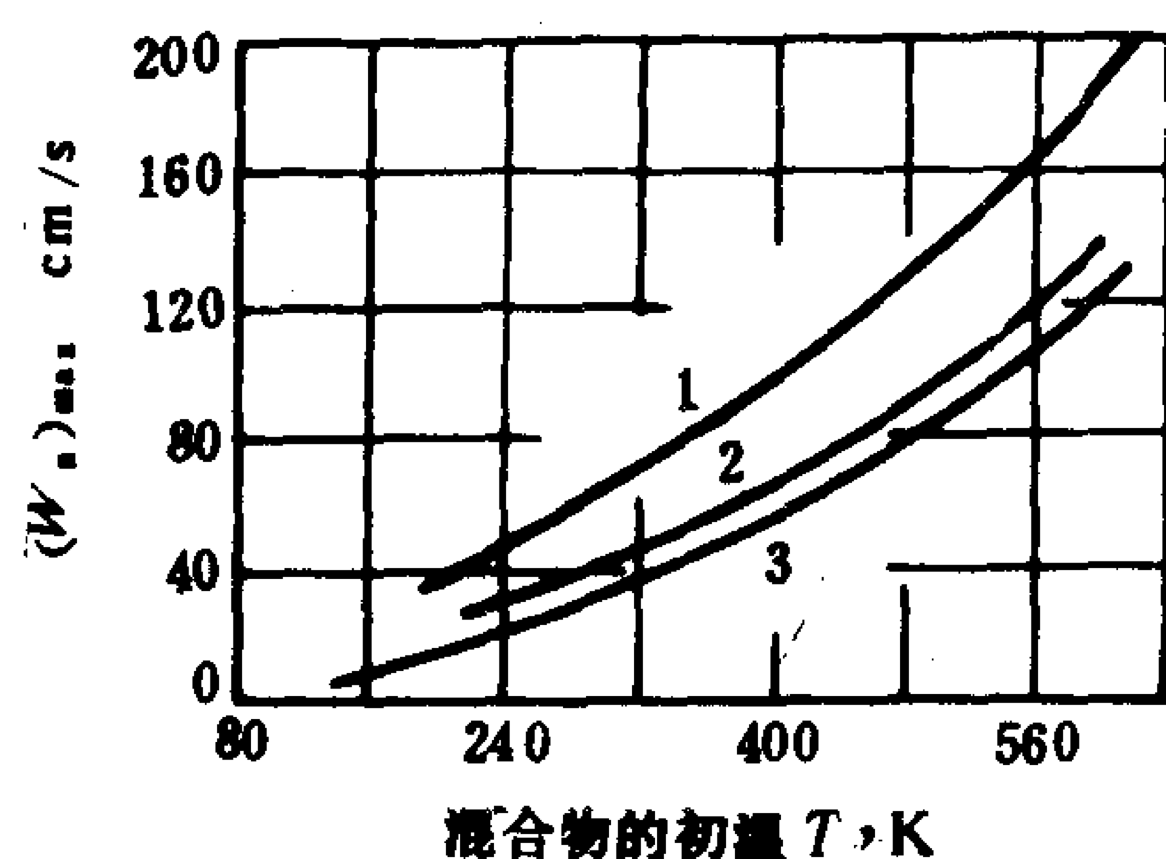


图 1.1.6-7 混合物初温对（Wn）max 的影响
1-C_2H_4+空气；2-C_3H_8+空气；3-CH_4+空气

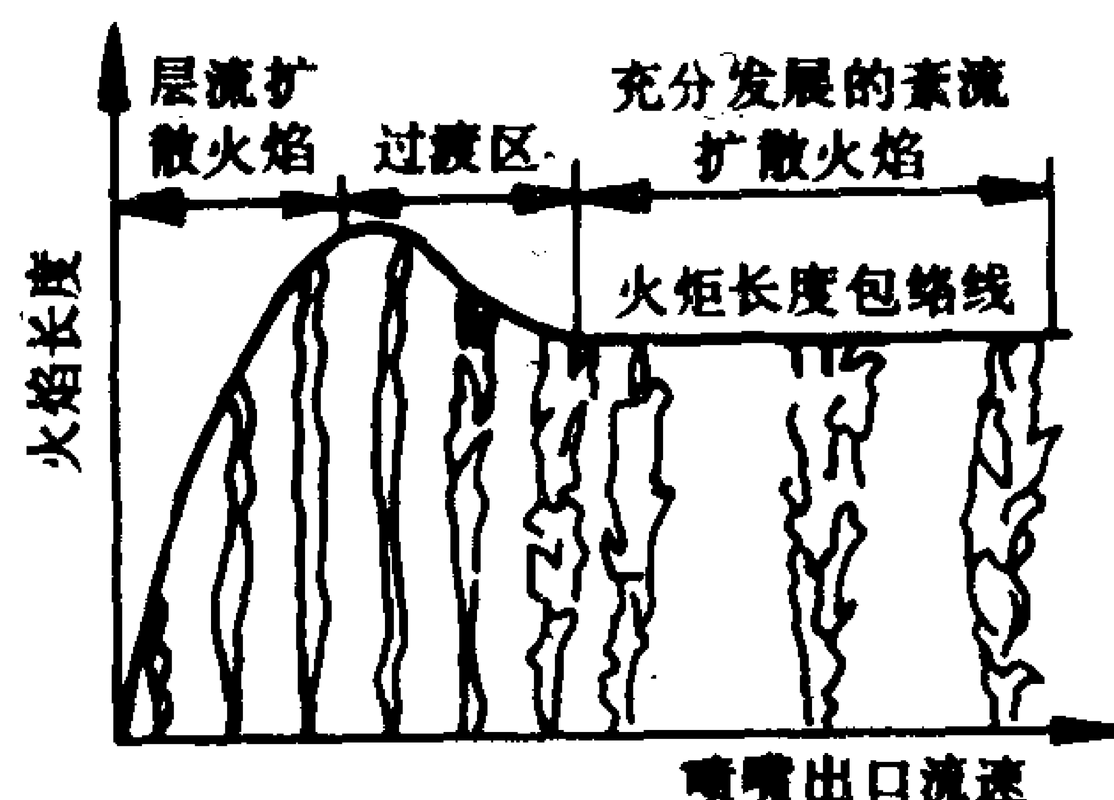


图 1.1.6-8 层流扩散燃烧和紊流扩散燃烧示意图

1.5 液体燃料的燃烧

液体燃料的燃烧大体分为：预蒸发型燃烧，即将液体燃料加热，使其蒸发为气相燃料而进行燃烧；液面燃烧和液雾燃烧。其中以液雾燃烧方式最普遍。

液体燃料的沸点低于着火点，受热后液体燃料先气化，同时燃烧，故液体燃料的燃烧是单相反应。要强化燃烧应增加燃料蒸发表面，因此在工业上都使液体燃料在雾状油滴状态下燃烧。图 1.1.6-11 表示油滴燃烧的情况，燃料蒸气向外扩散，氧向内扩散，燃烧产物则分别向内外扩散。燃烧放热依靠辐射及燃烧产物扩散传递给油滴促使蒸发，另一部分热量传给外界，所以在油滴周围形成一球状扩散火焰。影响油滴燃烧速度的主要因素是油滴半径 r_0。燃烧所需要的时间 $\tau=r_0/\psi$，表 1.1.6-7

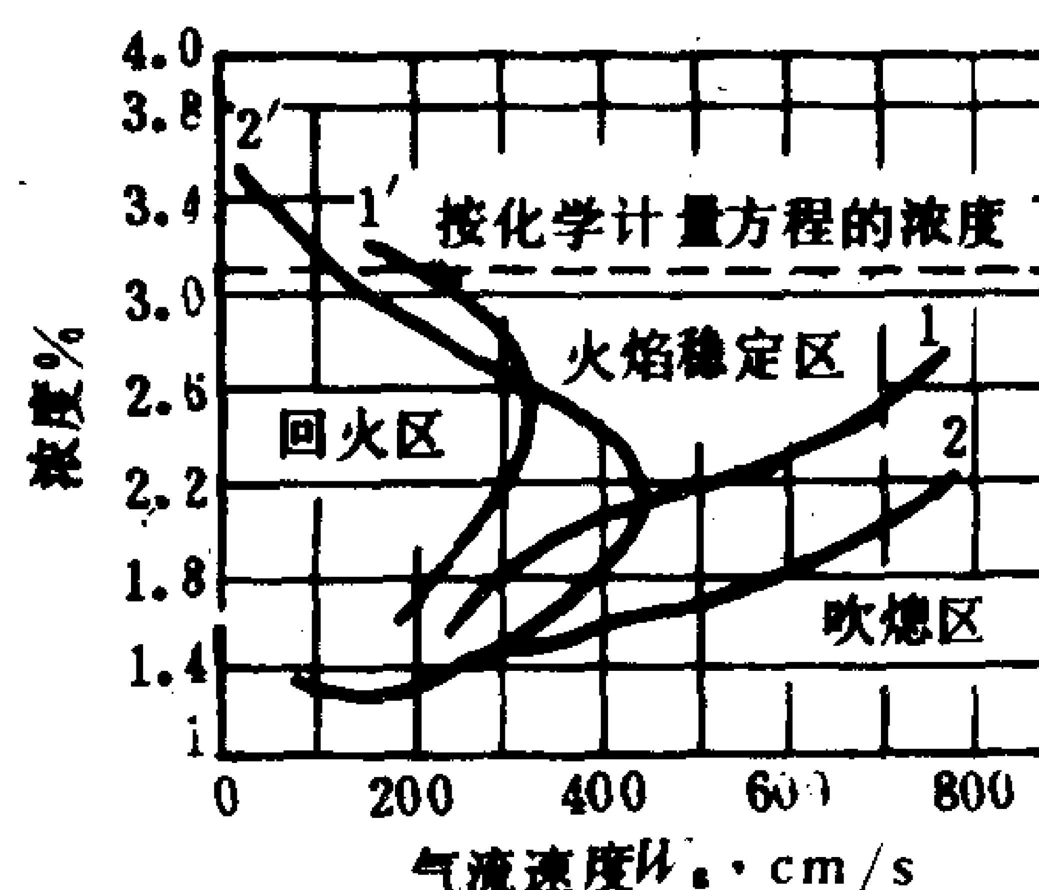


图 1.1.6-9 C_4H_{10} 吹熄及回火界限
1-喷嘴d=25.4 mm吹熄曲线；
2-喷嘴d=50.8 mm吹熄曲线；
1'-喷嘴 4=25.4 mm回火曲线；
2'-喷嘴d=50.8 mm回火曲线。

列出了ψ的实测值。所以油滴越细，油滴在油雾中分布越均匀，燃烧越强烈。在柴油机中，从喷嘴喷出的燃料受到燃烧室内高压空气的作用被粉碎雾化。雾化机理随着喷出的速度，燃料的粘性和表面张力，流向喷孔的流动状态，喷孔的长度与直径之比的不同而不同。

表 1.1.6-7　　燃烧速度系数 ψ

燃　　料	周　围　温　度　℃	ψ　mm²/s
汽　　油	700	1.10
	800	1.45
	850	1.49
轻　　油	655	1.12
	700	1.09
	750	1.10
	800	1.18
	900	1.90
	995	2.15
煤　　油	20	0.96
柴　　油	20	0.79

当燃料刚从喷嘴喷射出来时，它与气流的相对速度很大。由于相对速度的影响，油滴周围不再是球对称的斯蒂芬流了。实验发现，这时包围油滴的火焰不再是球形而呈卵形了。在强迫对流情况下，油滴的燃烧速度近似为：

$$G=2\pi\ \frac{\overline{\lambda}}{C_p}\ N^*_{uT}\ r_o \ln\left[1+\frac{C_p\ (T_f-T_o)}{q_e}\right] \tag{1.1.6-18}$$

式中，$\overline{\lambda}$为油滴的平均导热系数，C_p为燃油蒸汽的等压比热，r_o为油滴半径，T_o为油滴表面温度，T_f为火焰温度，q_e为油滴的蒸发热，N^*_{uT}为努谢尔特数，$N^*_{uT}=\alpha_*\ d_o/\lambda$，$\alpha_*$为对流换热系数，$d_o$为油滴半径。

液雾是许多粒度不等的油滴群。油滴在相互靠近的条件下燃烧时，一方面它们的扩散燃烧锋面互相传热，另一方面又相互妨碍着氧扩散到它们的火焰锋面，这与单个油滴的燃烧情况不同。实验证明，当液雾是油滴径很小的油滴群组成时，作为油滴群整体来说，同气体燃料的燃烧相类似。在滴径较大时，油滴群中各油滴是独立进行燃烧的。滴径大而且分散时，

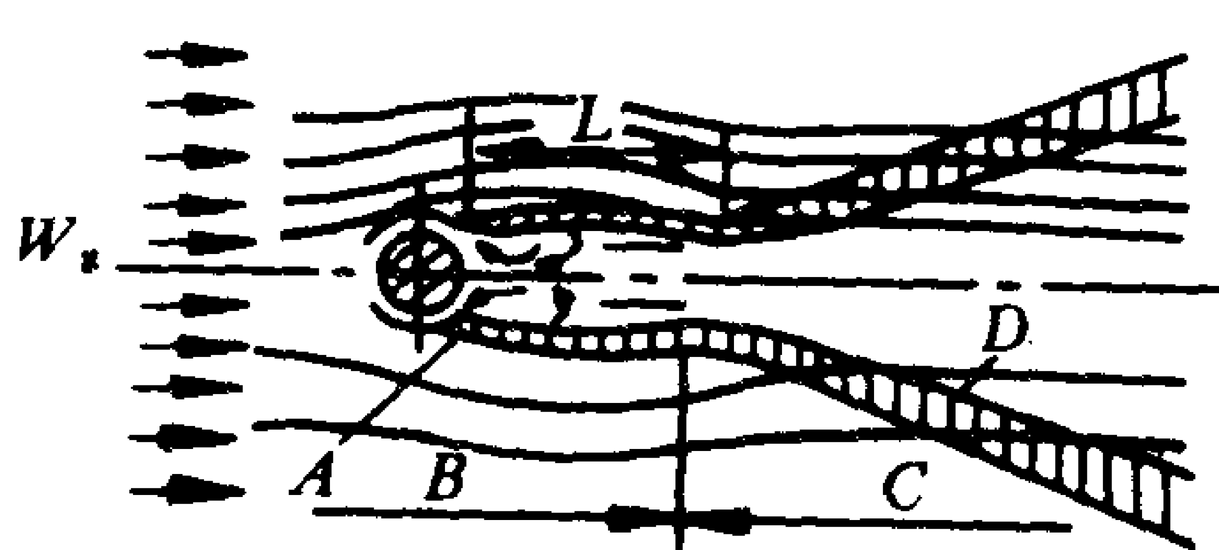


图 1.1.6-10　钝体的回流作用
A-燃烧着的回流气体；B-第一燃烧区；C-第二燃烧区；D-向下游不断扩展的火焰前锋；L-回火区长度

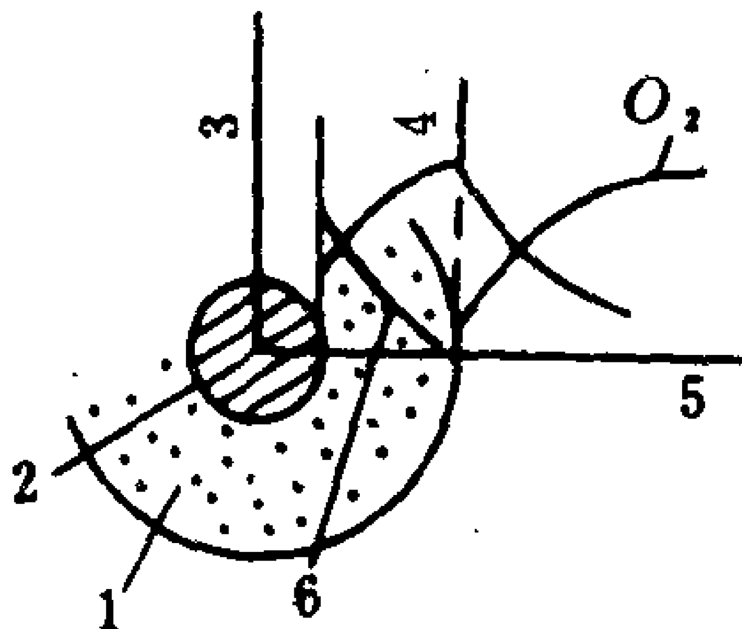


图 1.1.6-11　油滴燃烧示意图
1-油蒸气层；2-油滴；3-浓度、温度；4-距离；5-距离；6-油蒸气浓度

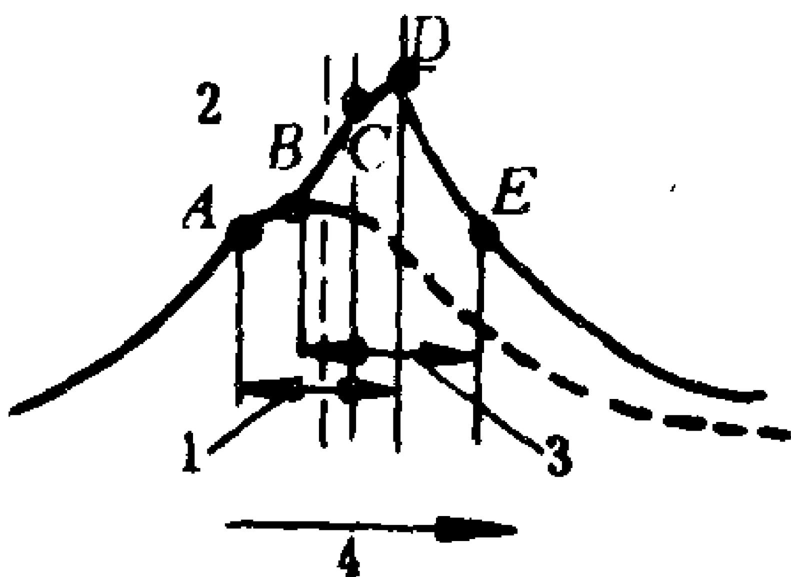


图 1.1.6-12
压燃式发动机的燃烧压力
1-喷射期；2-燃烧压力；3-燃烧期；4-曲柄角度

其燃烧就同单个油滴更相似。通常在喷雾燃烧中，油滴的直径是不均匀的，各种大小尺寸的油滴混合在一起，所以上述的燃烧形式同时存在，而且相互影响。

油滴群的燃烧速度满足下述关系：

$$d^2 = d_0^2 - \psi_1 t \tag{1.1.6-19}$$

式中，d 为任意时刻 t 的滴径，d_0 为 $t=0$时的滴径，ψ_1为油滴蒸发速度系数。这个关系式与单个油滴燃烧的关系式在形式上完全相同，但是ψ_1值减小。

油滴与周围气流间的相对速度小的时候，在油滴的周围形成包围火焰。当油滴与气流的相对速度大于某一值时，火焰就尾随在油滴的后面，形成尾流火焰。从包围火焰过渡到尾流火焰称之为油滴火焰的过渡。但是过渡后的油滴的燃烧率与未燃烧时的蒸发率值几乎相同。斯帕尔丁认为相对速度 W_c 超过下述关系就要引起过渡：

$$W_c/d = 100 \quad 1/s \tag{1.1.6-20}$$

油滴的阻力系数 C_D^* 具有如下关系式：

$$C_D^* (1+B) = C_D \tag{1.1.6-21}$$

式中，B 是表示物质流束大小的参数，未燃烧时为：

$$B = C_m (T_i - T_d)/L \tag{1.1.6-22}$$

而燃烧时为：

$$B = [C (T_i - T_d) + (m_o H/S)]/L \tag{1.1.6-23}$$

式中，T_d 为燃烧时的沸腾温度，T_i 为周围流体的温度，L 为蒸发潜热，H 为燃烧时产生的热量，m_o 为油滴周围气体中氧的浓度，S 为氧的化学当量比，C 为在 T_d 与 T_i 温度下周围流体比热的算术平均值，C_m 为温度为 T_i 时周围流体比热与温度为 T_d 时燃料气体比热的算术平均值，C_D 为固体小球的阻力系数。上述关系式是滴径在 25～500μm，雷诺数 R_e 在 0.01～15，B 值在 0.06～12.3 范围内的实验公式。

在微小滴径的油滴群中所传播的火焰，与气体燃料预混合气的火焰相同，称之为预混合火焰传播；在大滴径的油滴群中，各油滴处都形成独立的扩散火焰，同时飞快地越过油滴，进行火焰传播，这种传播形式称为不连续火焰传播。油滴群中的火焰传播是这两种传播形式的混合，其机理十分复杂。

在压燃式发动机中，混合气的形成与燃烧是同时进行的，燃烧是在气、液两相混合存在的情况下进行的。从燃料喷入燃烧室到燃烧终了为止，可分为四个时期。如图 1.1.6-12 所示，A 为喷射始点，B 为燃烧始点，D 为喷射终点，E 为燃烧终点。AB 为着火延迟时期，BC 为急速燃烧时期，CD 为缓慢燃烧时期，DE 为后期燃烧时期。在 A 点开始喷射燃料，油滴在高温的燃烧室内被加热、蒸发而形成可燃混合气，于是在几个点开始着火，压力上升。着火一旦开始，火焰就在燃烧室内已形成的可燃混合气中急速传播扩大，压力急速上升，大部分混合气燃烧完毕，于是达到了 C 点，可是喷射还在继续进行，这时由于燃烧室处于高温下，着火延迟变得非常短，因而压力上升率减小。到 D 点燃料喷射停止，燃烧还在继续进行，如 DE 所示。此时燃烧室中的氧的浓度降低，燃烧时间拖长，出现增大排烟浓度的倾向。

1.6 固体燃料的燃烧

固体燃料燃烧是多相燃烧，由一系列复杂的物理化学过程组成。煤在加热升温时，首先煤颗粒变软，成为塑性状态，失掉颗粒的棱角，变得近似于球形，同时析出气态可燃物，即挥发分。挥发分析出之后，剩余的固体称为焦炭。如温度条件满足，挥发分将在焦炭颗粒外

围首先燃烧，形成空间气相火焰，而焦炭将与气相氧化剂发生气态固体两相燃烧。挥发分析出和着火，焦炭形成等阶段，虽然大体上有先后之分，但是各阶段是相互联系重叠进行的。表 1.1.6-8 列出各种煤析出挥发分的温度。

表 1.1.6-8　　**各种煤挥发分开始析出温度**

煤　　种	无　烟　煤	烟　　煤	长　焰　煤	褐　　煤
挥发分开始析出的温度 ℃	~400	210~240	~170	130~170

煤的热解，即放出挥发分，也称为破坏性蒸馏。煤热解产生的挥发分的质量百分数随热解温度的升高而增大。降低环境压力，减小煤颗粒的尺寸也有利于挥发分的析出。表 1.1.6-9 列出在不同温度下煤放出挥发分的数量。煤的含灰量越高，挥发分越低，煤粉火焰的传播速度越低。多灰分、低挥发分煤的着火要困难些。图 1.1.6-13 表示出煤粉气流的火焰传播速度与煤的挥发分和灰分的关系，V^Y 和 A^Y 分别代表挥发分和灰分的质量百分数（见燃料一节的内容）。

表 1.1.6-9　　**煤在不同温度下析出挥发分的质量百分数**

热　解　温　度　K	800	1390	1720	2170
质　量　百　分　数　%	38.3	48	60	71

	V^Y	A^Y
1	15%	5%
2	30%	40%
3	20%	5%
4	30%	30%
5	30%	15%
6	30%	5%

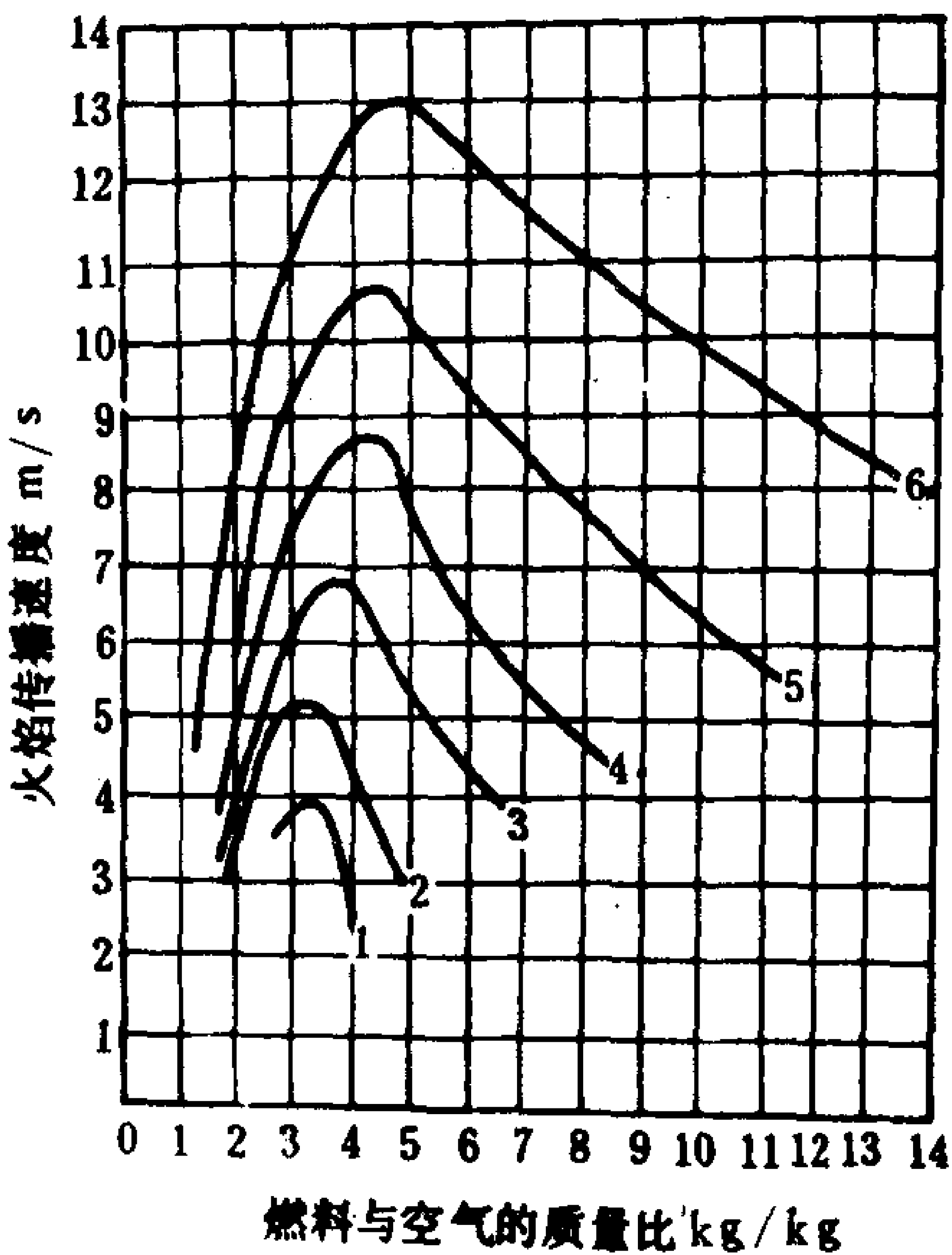


图 1.1.6-13　煤粉气流的火焰传播速度

挥发分在焦炭球外的燃烧类似于液滴蒸汽的球形燃烧。挥发分的组分很多，挥发分的燃烧一般指以下几种反应：甲烷的氧化反应，乙炔的氧化反应，乙炔乙烯的氧化反应。它们的反应速度常数都满足下列关系式：

$$k=10^{A} T^{N} exp\ (-E/RT) \quad (1.1.6\text{-}24)$$

式中，E 为活化能，R 为通用气体常数，可以从燃烧学的有关资料中查出指数 A、N 和 RT 的数值。

固体燃料燃烧的时间主要取决于焦炭的燃烧时间 τ_c，它又和氧扩散到碳表面所需时间 τ_d 及化学反应所需时间 τ_r 有关：

$$\tau_c=\tau_d+\tau_r \quad (1.1.6\text{-}25)$$

依照扩散和化学反应条件的不同，固体燃料的燃烧分为下列三种情况：

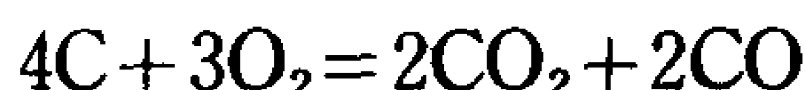
1）扩散燃烧：当温度很高时，化学反应速度常数很大，化学反应的速度远远超过氧的扩散速度。燃烧速度主要取决于氧的扩散能力。

2）动力燃烧：当温度较低时，氧的扩散能力大大地超过化学反应能力，燃烧速度取决于化学反应速度。

3)过渡燃烧：当氧的扩散速度和化学反应速度处于同一量级时，燃烧介于扩散燃烧和动力燃烧之间，燃烧速度既与化学反应能力也与氧的扩散条件有关。

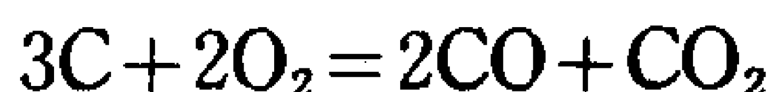
煤在燃烧时，首先析出挥发分，剩下的是固体焦炭，其中含有一些矿物杂质，燃烧终了它形成灰分。通常把碳的燃烧作为焦炭燃烧的理想物理模型。

碳与氧燃烧过程中的初次反应为：



$$4C+3O_2=2CO_2+2CO$$

或

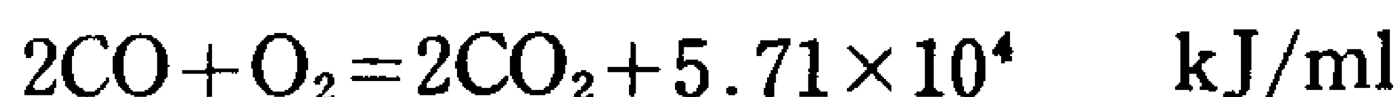


$$3C+2O_2=2CO+CO_2$$

碳燃烧过程中的二次反应为：



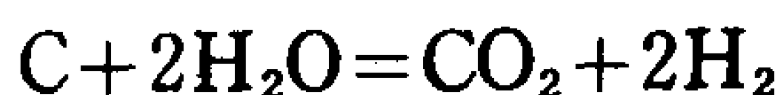
$$C+CO_2=2CO-1.62\times10^4 \quad kJ/ml$$



$$2CO+O_2=2CO_2+5.71\times10^4 \quad kJ/ml$$

以上四个反应在燃烧过程中同时交叉和平行地进行着。

如果燃烧过程中有水蒸汽存在，那么还会发生以下反应：



$$C+2H_2O=CO_2+2H_2$$



$$C+H_2O=CO+H_2$$



$$C+2H_2=CH_4$$

如图 1.1.6-14，碳球表面温度越高，CO_2 热分解的还原反应进行得越快，所产生的 CO 在碳球附近又与扩散来的氧气重新产生第二次的 CO_2。所以在 $\alpha>1$ 和 $\alpha<1$ 的界面附近出现一个 CO_2 浓度最高区域。然后 CO_2 再向两个方向扩散，重复原来的反应。因此在较高的温度下二次反应将成为主要反应，如图 1.1.6-15 所示。

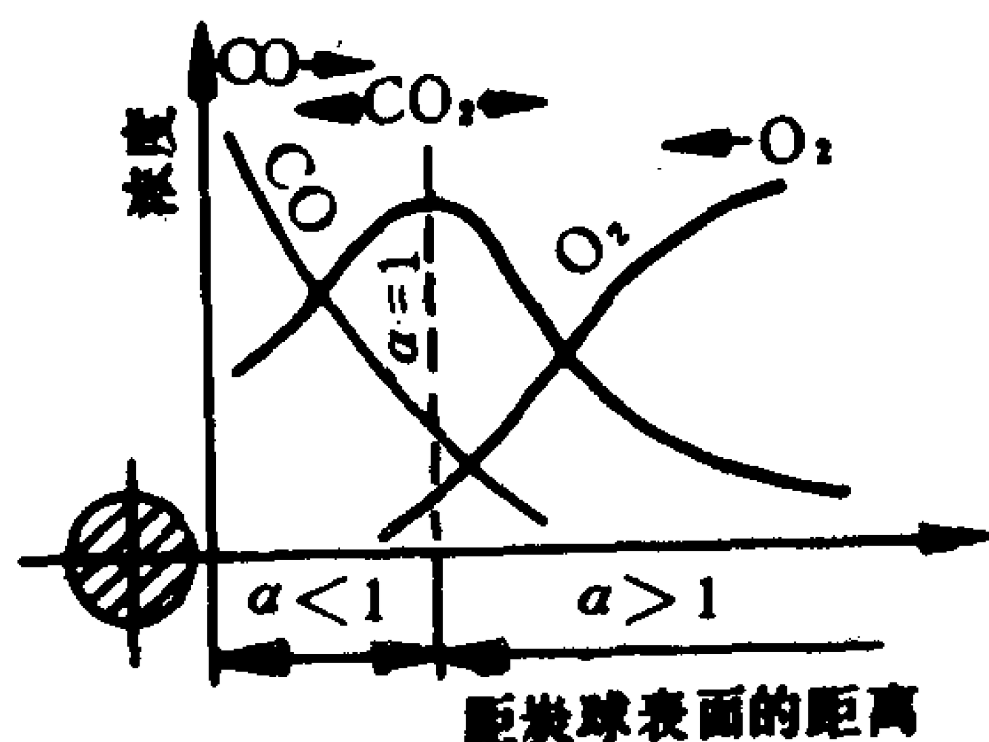


图 1.1.6-14　高温下碳球的燃烧

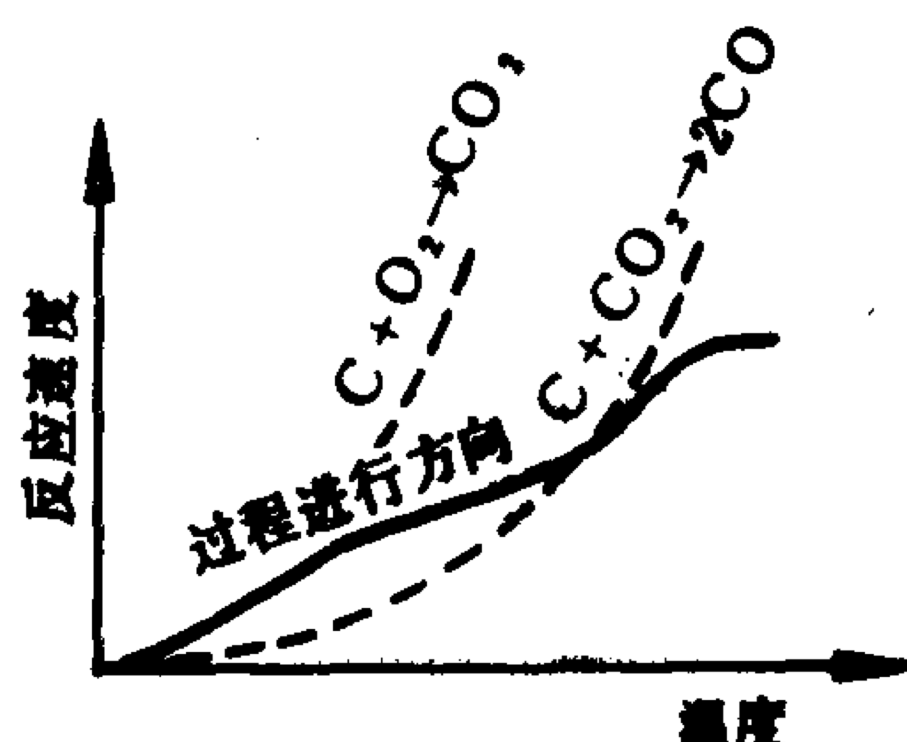


图 1.1.6-15　碳粒燃烧随温度的变化

煤粉与一次风气流喷进炉膛后，受到对流传热与辐射传热而升温着火。煤粉的燃烧速度要比气体燃料与空气可燃预混物的燃烧速度低得多，火焰锋面不象气体燃料预混火焰锋面那样薄，而是十分厚，所以火焰锋面内的温度梯度相当小，导热量很小。煤粉在较高温度下才进入扩散燃烧区，如 0.1 mm 的碳粒在 1700℃ 左右才进入扩散区。煤粉炉中，只有在高温的火炬中心才可能是扩散燃烧。在高温中心以外，特别是炉膛出口附近都是过渡燃烧区或动力燃烧区。故提高煤粉与气流的相对速度和提高温度均可使燃烧更完全。对于层燃炉，煤块多在扩散区燃烧，增加空气流速就能够强化燃烧。

2　燃料

目前使用的燃料主要是有机燃料，如煤、石油制品、天然气等。

2.1　燃料的成分

固体和液体燃料中的水分 W 和灰分 A 是不能燃烧的物质，除此之外的物质称为燃质。

燃质主要由碳 C、氢H、氧 O、氮 N、硫 S 构成。对煤来说，挥发分 V 也是重要的燃质。

固体和液体燃料的成分常用质量百分比表示。固体燃料通常采用四种“基”作为计算基数。

1)应用基用上角标 Y 表示，它以包括水分和灰分在内的燃料成分总量作计算基数，进行燃烧计算时应当用应用基成分。

2)分析基用上角标 f 表示，它以在空气中风干后的燃料成分总量作计算基数。此时固体燃料的外在水分已逸出，仍旧残留在燃料中的水分称为内在水分。

3)干燥基用上角标 g 表示，它以干燥的，即除了水分以外的燃料成分总量作计算基数。燃料中的水分变化时，干燥基不受影响。

4)可燃基用上角标 r 表示，它以无水、无灰的燃质成分总量作计算基数。可燃基成分不受水分、灰分变化的影响。因此用可燃基成分表示燃质的成分是较为合理的。各种“基”之间的换算系数见表 1.1.6-10。

表 1.1.6-10　　换 算 系 数

已知成分	角　标	欲求成分			
		应用基	分析基	干燥基	可燃基
应用基	Y	1	$\frac{100-W^f}{100-W^y}$	$\frac{100}{100-W^y}$	$\frac{100}{100-A^y-W^y}$
分析基	f	$\frac{100-W^y}{100-W^f}$	1	$\frac{100}{100-W^f}$	$\frac{100}{100-A^f-W^f}$
干燥基	g	$\frac{100-W^y}{100}$	$\frac{100-W^f}{100}$	1	$\frac{100}{100-A^g}$
可燃基	r	$\frac{100-A^y-W^y}{100}$	$\frac{100-A^f-W^f}{100}$	$\frac{100-A^g}{100}$	1

应用基元素分析是：

$$C^Y+H^Y+O^Y+N^Y+S^Y+A^Y+W^Y=100\%$$

应用基工业分析是：

$$C^Y+V^Y+A^Y+W^Y=100\%$$

V^Y、C^Y、A^Y、W^Y 分别为应用基的挥发分、碳分、灰分和水分。

气体燃料通常由 CO、H_2、H_2S、各种碳氢化合物以及 CO_2、O_2、N_2组成，其成分用容积百分比表示。通常以干燥的气体燃料作计算成分的标准。水分则以每标准立方米干燥气体中的水蒸汽克数表示。

当缺乏煤的元素成分资料时，可由工业分析结果估算。对无烟煤：

$$C^r+0.375\ S^r=C^r_{GD}+0.02\ V^r$$

式中：C^r_{GD}——为可燃基的固定碳；

V^r——可燃基的挥发分。对烟煤：

$$C^r+0.375\ S^r=C^r_{GD}+0.9\ (V^r-H^r)$$

其中：$H^r=V^r\ [7.35/(V^r+10)-0.013]$。

对无烟煤 $N^r=0.07\ V^r$，对烟煤 $N^r=2.10-0.012\ V^r$。氧的成分用 100 减去其它成分即得。

2.2 热值

单位物量(对固体和液体燃料为 1 kg，对气体燃料为标准状况下的 1 立方米(Nm^3)燃料

完全燃烧时放出的热量称为热值。燃烧产物中的水保持蒸汽状态时的热值称为低热值(Q_{DW})，而水保持为液体状态时的热值称为高热值（Q_{GW}）。工业中一般用 Q_{DW}，两者关系为：

$$Q_{GW}^{y}-Q_{DW}^{y}=25.12\ (9H^{y}+W^{y}) \quad \text{kJ/kg}$$

$$Q_{GW}^{f}-Q_{DW}^{f}=25.12\ (9H^{f}+W^{f}) \quad \text{kJ/kg}$$

各种基的高热值之间的换算可按表 1.1.6-10 进行，各种基的低热值可按下式换算到应用基：

$$Q_{DW}^{y}=4.187\ (Q_{DW}^{f}+6W^{f})\frac{100-W^{f}}{100-W^{f}}-25.12\ W^{y} \quad \text{kJ/kg}$$

$$Q_{DW}^{y}=4.178\ Q_{DW}^{g}\ \frac{100-W^{y}}{100}-25.12\ W^{y} \quad \text{kJ/kg}$$

$$Q_{DW}^{y}=4.178\ Q_{DW}^{r}\ \frac{100-W^{y}-A^{y}}{100}-25.12\ W^{y} \quad \text{kJ/kg}$$

2.2.1 固体和液体燃料的热值计算

表 1.1.6-11 无烟煤的 k_0

可燃质挥发分 V^r %	≤2.5	>2.5～5.0	>5.0～7.5	>7.5
k_0	200	300	400	500

注：对于 $A^g=40\sim50\%$的无烟煤，查取 k_0时采用经校正的 V^r（测定的 V^r 减去 $0.1A^g$）。

表 1.1.6-12 烟煤的 k_1

可燃质挥发分 V^r %	>10～14	>14～18	>18～22	>22～28	>28～32	>32～36	>36～40	>40～55
k_1	84.5～86	82～86	79～87	78～86.5	76～86	74.5～85.5	74.5～84	74～83

注：只有 $V^r<35\%$，而 $W^f\geq3\%$的烟煤才在 Q_{GW}^{f} 的公式中减去 $40W^f$。

表 1.1.6-13 褐煤的 k_2

可燃质挥发分 V^r %	>37～44	>44～48	>48～55	>55～60	>60
k_2	50	−100	−300	−400	−550

表 1.1.6-14 燃油密度修正值 $\Delta\rho$

相对密度 ρ_4^{20}	$\Delta\rho$	相对密度 ρ_4^{20}	$\Delta\rho$	相对密度 ρ_4^{20}	$\Delta\rho$	相对密度 ρ_4^{20}	$\Delta\rho$	相对密度 ρ_4^{20}	$\Delta\rho$
0.700～0.710	0.0051	0.760～0.770	0.0048	0.820～0.830	0.0044	0.880～0.890	0.0041	0.940～0.950	0.0037
0.710～0.720	0.0050	0.770～0.780	0.0047	0.830～0.840	0.0044	0.890～0.900	0.0040	0.950～0.960	0.0037
0.720～0.730	0.0050	0.780～0.790	0.0046	0.840～0.850	0.0043	0.900～0.910	0.0040	0.960～0.970	0.0036
0.730～0.740	0.0049	0.790～0.800	0.0046	0.850～0.860	0.0042	0.910～0.920	0.0039	0.970～0.980	0.0036
0.740～0.750	0.0049	0.800～0.810	0.0045	0.860～0.870	0.0042	0.920～0.930	0.0038	0.980～0.990	0.0035
0.750～0.760	0.0048	0.810～0.820	0.0045	0.870～0.880	0.0041	0.930～0.940	0.0038	0.990～1.000	0.0034

表 1.1.6-15 可燃气体的低热值 (kJ/Nm³)

可燃气体	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	乙烯	丙烯	丁烯	硫化氢	氢	一氧化碳
分子式	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_2H_4	C_3H_6	C_4H_8	H_2S	H_2	CO
低热值 Q_{DW}	8555	15266	21795	28338	34890	14107	20541	27111	5585	2579	3018

1)按元素分析成分

$$Q_{DW}^{y}=4.187\ [81\,C^{y}+246\,H^{y}-26\,(O^{y}-S^{y})-6\,W^{y}] \quad \text{kJ/kg}$$

2)按工业分析成分

无烟煤：

$$Q_{GW}^{f}=334.94\ [100-(W^{f}+A^{f})]\ +4.187\ k_0-41.868\ A^{f} \quad \text{kJ/kg}$$

烟煤:

$$Q_{GW}^{f}=4.187\{k_1\ [100-(W^{f}+A^{f})]\ -6A^{f}-40\ W^{f}\} \quad \text{kJ/kg}$$

褐煤:

$$Q_{GW}^{f}=4.187\{70\ [100-(W^{f}+A^{f})]\ +k_2-5A^{f}\} \quad \text{kJ/kg}$$

煤的标准热值为 29307 kJ/kg (7000 kcal/kg)。k_0、k_1、k_2见表 1.1.6-11～13。

3)液体燃料无元素成分时

$$Q_{GW}^{r}=4.167\ [12400-2100\ (\rho_{15.6}^{15.6})^2] \quad \text{kJ/kg}$$

式中，$\rho_{15.6}^{15.6}$为同体积的燃油与水在 15.6℃时的质量比，$\rho_{15.6}^{15.6}=\rho_4^{20}-\Delta\rho$，$\rho_4^{20}$是 20℃的燃油和 4℃的纯水的质量比。$\Delta\rho$ 按表 1.1.6-14 查得。

4)燃油的标准热值为 41868 KJ/kg (10000 kcal/kg)。

2.2.2 气体燃料热值估算

$$Q_{DW}^{Y}=4.187\left[\Sigma\frac{k}{100}Q_{DW}-4.83\ H_2O\right] \quad \text{kJ/Nm}^3$$

式中，H_2O 为水蒸汽体积百分数，k 为各项可燃气体的体积百分数，Q_{DW} 为各项可燃气体的低热值 kJ/Nm^3。可燃气体的低热值见表 1.1.6～15。

2.3 几种液体燃料的性质

参见表 2.2.2-1、表 2.2.3-2。

燃油相对密度随温度变化的关系是:

$$\rho_4^{t}=\rho_4^{20}-\alpha\ (t-20)$$

式中，α为温度修正系数 1/℃，见表 2.2.4-21。

3 燃烧计算

对固体和液体燃料，燃烧是指 1 kg 燃料，对气体燃料是指标准状态下 $1\ m^3$的燃料。

3.1 理论空气量

理论空气量是指燃料在完全燃烧时理论上所需要的空气量。实际上要多送一些空气，使燃料尽可能地完全燃烧，实际空气量与理论空气量之比为过剩空气系数 α。

1 kg 固体或液体燃料燃烧时所需要的理论空气量:

$$V^0=0.0889\ (C^y+0.375\ S^y)\ +0.265\ H^y-0.0333\ O^y \quad \text{Nm}^3/\text{kg}$$

或 $$L^0=0.115\ (C^y+0.375\ S^y)\ +0.342\ H^y-0.0431\ O^y \quad \text{kg/kg}$$

标准状态下 $1\ m^3$气体燃料燃烧时所需要的理论空气量是:

$$V^0=0.0476\ [0.5\ CO+0.5\ H_2+1.5\ H_2S]\ +\Sigma(m-\frac{4}{n})\ C_m H_n-O_2] \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

3.2 烟气的容积

当过剩空气系数为 α 时，1 kg 固体或液体燃料燃烧后的烟气量 V_y 可按下式计算:

1)CO_2 和 SO_2 (总称 RO_2) 的容积

$$V_{RO_2}=1.866\left(\frac{C^y+0.375\ S^y}{100}\right)\quad \mathrm{Nm^3/kg}$$

2)N_2的容积

$$V_{N_2}=0.8\frac{N_y}{100}+0.79\ \alpha V^0\quad \mathrm{Nm^3/kg}$$

3)O_2 的容积

$$V_{O_2}=0.21\ (\alpha-1)\ V^0\quad \mathrm{Nm^3/kg}$$

4)水蒸汽的容积

$$V_{H_2O}=0.124\ W^y+0.111H^y+0.0161\ \alpha V^0\quad \mathrm{Nm^3/kg}$$

5)烟气总容积

$$V_y=V_{RO_2}+V_{N_2}+V_{O_2}+V_{H_2O}\quad \mathrm{Nm^3/kg}$$

标准状态下 1 M^3气体燃料燃烧后的烟气量：

1)CO_2 和 SO_2 （总称 RO_2）的容积

$$V_{RO_2}=0.01\ [CO_2+CO+H_2O+\sum m\ C_mH_n]\quad \mathrm{Nm^3/Nm^3}$$

2)N_2 的容积

$$V_{N_2}=\frac{N_2}{100}+0.79\ \alpha V^0\quad \mathrm{Nm^3/Nm^3}$$

3)O_2的容积

$$V_{O_2}=0.21(\alpha-1)V^0\quad \mathrm{Nm^3/Nm^3}$$

4)水蒸汽的容积

$$V_{H_2O}=0.01\ (H_2S+H_2+\sum\frac{n}{2}\ C_mH_n+0.124\ d_{qr}+1.61\ \alpha V^0)\quad \mathrm{Nm^3/Nm^3}$$

式中，d_{qr} 为气体燃料所含的水分 g/Nm^3。

5)烟气总容积

$$V_y=V_{RO_2}+V_{N_2}+V_{O_2}+V_{H_2O}\quad \mathrm{Nm^3/Nm^3}$$

3.3 燃料的特性系数和理论最大 RO_2值

燃料特性系数 β是：

$$\beta=2.35\frac{H^y-0.126\ O^y+0.04\ N^y}{C^y+0.375\ S^y}\qquad (1.1.6\text{-}26)$$

β 只与燃料的可燃物质有关，对每一种燃料基本上是一常数。

当 $\alpha=1$时，完全燃烧的RO_2的体积百分数是理论上可能达到的最大值，以 $(RO_2)_{max}$ 表示。

$$(RO_2)_{max}=\frac{21}{1+\beta}\ \%\qquad (1.1.6\text{-}27)$$

各种燃料的 β 和 $(RO_2)_{max}$ 见表 1.1.6-16。

表 1.1.6-16　　各种燃料的 β 和 $(RO_2)_{max}$

	无烟煤	烟煤	重油	天然气
β	0.05~0.1	0.09~0.15	0.30	0.78
$(RO_2)_{max}\%$	19~20	18.0~19.5	16	11.8

3.4 由烟气分析结果计算过剩空气系数

燃烧煤或油时，如燃烧完全，则过剩空气系数：

$$\alpha=\frac{21}{21-79\times\frac{O_2}{100-(RO_2+O_2)}} \tag{1.1.6-28}$$

式中，RO_2 为烟气中 CO_2 和 SO_2的容积百分数，O_2 为烟气中 O_2的容积百分数。

如燃烧不完全，则：

$$\alpha=\frac{21}{21-79\times\frac{O_2-0.5\ (CO+H_2)\ -2CH_4}{100-(RO_2+O_2+CO+H_2+CH_4)}} \tag{1.1.6-29}$$

或用下式近似计算：

$$\alpha\approx\ (RO_2)_{max}/RO_2$$

以上三个公式不适用于含氮较多的气体燃料。

3.5 理论燃烧温度

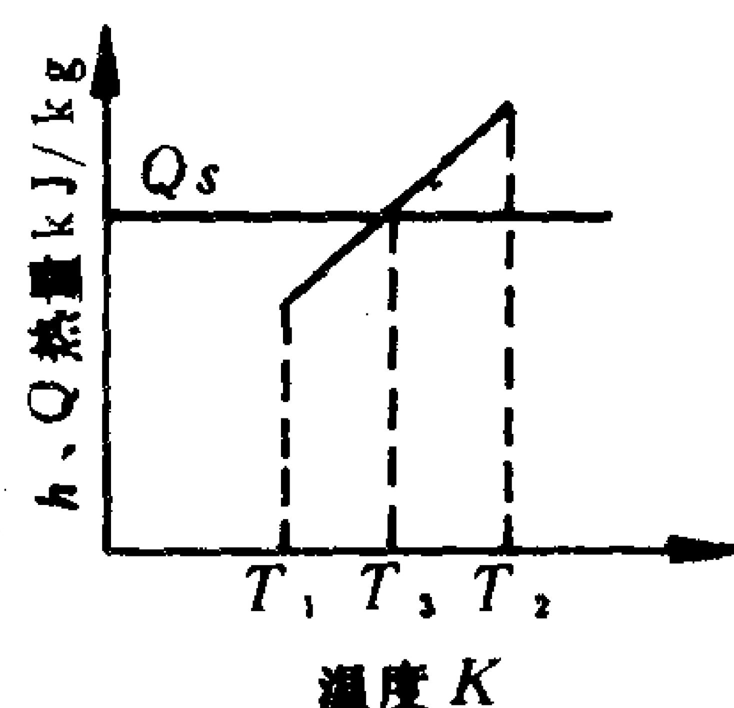


图 1.1.6-16
逼近温度图解求法

在绝热条件下燃料燃烧时烟气所能达到的最高温度是理论燃烧温度t_1，t_1的计算可按下述步骤进行：

1)计算输入燃烧室的热量 Q_S：

$$Q_S=Q^y_{DW}+Q_K+Q_R \qquad KJ/kg$$

式中，Q_K 为燃烧所需空气带入的热量，$Q_K=h_K^*\alpha V^0$，h_K^* 是空气容积焓；Q_R 为燃料物理热，$Q_R=ct_R$，C是燃料比热，t_R 是燃料温度℃。

2)假定两个不同的烟气温度T_1、T_2，计算烟焓 h_1、h_2：

$$h_1=V_{RO_2}\cdot h^*_{RO_2}+V_{N_2}\cdot h^*_{N_2}+V_{H_2O}\cdot h^*_{H_2O}+V_{O_2}h^*_{O_2} \qquad KJ/kg$$

$$h_2=V_{RO_2}\cdot h^*_{RO_2}+V_{N_2}\cdot h^*_{N_2}+V_{H_2O}\cdot h^*_{H_2O}+V_{O_2}h^*_{O_2} \qquad KJ/kg$$

式中各个对应温度下的容积焓可在有关表中查到。

3)按图 1.1.6-16 求得 T_S。

4)以 T_S 作为新假定的火焰温度并计算 h_3，比较 h_3与 Q_S。如两者不等再对 T_S 作修正，重复计算 h，直至 $h=Q_S$。则该温度即为理论燃烧温度。

参考文献

〔1〕许晋源等：燃烧学，机械工业出版社，1980

〔2〕傅维标等：燃烧物理学基础，机械工业出版社，1984

〔3〕DB·斯帕尔丁著：马毓义译，燃烧理论基础，国防工业出版社，1964

〔4〕机械工程手册等编辑委员会：机械工程手册，机械工业出版社，1982

〔5〕A.M.kanury: Introduction to combustion phenomena, 1975

〔6〕马春霆编译：柴油机的燃烧，国防工业出版社，1985

第7章　电工基础

1　基本的物理概念

1.1　电子与电荷

一切宏观物体都是由原子和分子组成的，而原子又是由带负电荷的电子和带同量正电荷的原子核组成。电荷是物质的固有属性之一，自然界不存在脱离物质而单独存在的电荷。电子是最基本的、最小的带负电荷的粒子。所有其它带电物体的带电量只能是一个电子电荷量的整倍数。电荷的国际单位是库[仑]，符号是C。一个电子的电荷量$e=(1.60206\pm0.00003)\times10^{-19}C$。

1.1.1　电荷守恒定律

定律指出，电荷既不能被创造，也不能被消灭。它只能从一个物体转移到另一个物体上，或者在一已知的物体内移动。

1.1.2　带电体

任何带电现象，都是正负电荷的分离过程形成的。需要用某种形式的能量来完成这种分离过程。电子过剩的物体称为带负电的带电体，电子不足的物体称为带正电的带电体。

1.1.3　库仑定律

定律指出，带电量为q_1和q_2的两个点电荷之间的相互作用力是与它们所带电量的乘积$q_1\cdot q_2$成正比，并与它们之间的距离r的平方成反比。异号电荷之间的作用力为吸引力，同号者则为排斥力。作用力的方向与点电荷之间的连线重合。库仑定律可表示为

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{r^2} \tag{1.1.7-1}$$

式中，力F的单位是N，距离r的单位是m，电荷q的单位是C。ε是物质的介电系数。

1.1.4　介电系数

公式(1.1.7-1)中的ε称为物质的介电系数，用它来表示电荷所处空间的电介质的物理性质对作用力(或电场强度)大小的影响而引入的物理量。真空的介电系数：

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi\times9\times10^9}\ \mathrm{C^2/(N\cdot m^2)}$$

某一介质的介电系数ε与真空介电系数ε_0的比值，称为该介质的相对介电系数ε_r。几种常用的电介质的ε_r见表1.1.7-1。

表1.1.7-1　**几种电介质的相对介电系数**

介质名称	相对介电系数ε_r	介质名称		相对介电系数ε_r
石英玻璃	3.5～4.2	聚苯乙烯		2.2
空气	1	酚醛胶布层合板		5.0～6.0
变压器油	2.2～2.5	木材		2.5～8
硬纸	5～8	电容器用陶瓷	第一类（热康）	12～25
聚氯乙烯	3.1～3.5		第二类（钛康）	55～160
云母	7		第三类（钛酸钡）	1000～10000

1.2 电场

电场是一种处于特殊状态的空间。它的基本特征是能对任一引入的电荷作用以力。静止电荷周围空间的电场称为静电场。

1.2.1 电场强度

若将试验电荷q引入至电场中的某一点，其上所受的力为F，则比值F/q称为电场中该点的电场强度E。

$$E=\frac{F}{q} \quad \mathrm{N/C} \tag{1.1.7-2}$$

电场强度E是矢量，它的方向就是正电荷在该点作用力的方向。电场强度是表征电场物理性质的一个物理量。E的单位也可以用V/m。

1.2.2 电场强度的叠加性

如果电场是由若干个点电荷形成的，则该电场中某一点的场强等于每一个点电荷在该点引起的场强的矢量和。

1.2.3 电力线

电力线是一种人为的线条，是为了形象地表示出场强在空间的分布而引入的。在电场中，所画出的电力线上每一点的切线方向应与该点场强E的方向一致。在空间每一点电力线的密度，即通过垂直于场强方向单位面积的电力线数，应与该点的场强成正比。

1.2.4 电场中的能量

电场中具有能量。电场中单位体积的能量称为电能体密度。设电场中某点的介电系数是ε，场强是E，则电能体密度是

$$W=\frac{1}{2}\varepsilon E^2 \qquad \mathrm{J} \tag{1.1.7-3}$$

1.3 电位与电压

1.3.1 电位

电荷在静电场中移动时，电场力作功的特性是与重力作功的特性相似的。因此可以仿效重力位能的概念引入电位能的概念，认为电场所作的功是电位能改变的量度。设电荷q在电场中某一点的电位能为W，则比值W/q定义为该点的电位U。

$$U=\frac{W}{q} \qquad \mathrm{V} \tag{1.1.7-4}$$

电位是标量，它也是用来表征电场性质的物理量。

1.3.2 电压

电场（或电路）任意两点A、B间电位的差值$V_{AB}=U_A-U_B$，称为这两点间的电压。电压的单位也是伏〔特〕。在电路的分析和计算中，某些情况下（例如在电子电路中），通过计算或测量各点的电位值来获得任意两点间的电压值的方法更为可取。这时，可选择某一点为参考点，并令它的电位为零，于是其它各点对这一参考点的电压值就等于这些点相对于该参考点的电位值。参考点选择得不同，计算得的各点电位值也就不同，但由此而算得的任意两点间的电压值是不变的。

1.3.3 电位梯度

电场中某一点的场强在任一方向上的分量等于该点在这方向上的电位梯度的负值。负值

的意义表明场强的方向是指向电位降落的方向。

假定沿着电场方向AB两点间的距离为dl，两点间的电压降为dv，则有

$$E=-\frac{dv}{dl} \tag{1.1.7-5}$$

1.3.4 等位面

在已知的静电场中，每一点都有一确定的电位值。由电位相等的所有的点所连成的面称为等位面。电力线总是和等位面垂直的。

1.4 导体

从电的性质看，导体的特征是：带电质点（电子，正、负离子）在导体内部可以自由运动，在电场力的作用下，可以作有规则、定向的运动，亦即可以形成电流。

1.4.1 第一类导体—金属

这类导体的导电特征是自由电子在它内部作有规则的移动时，即有电流通过时，并不引起化学性质的变化，也没有任何质量的迁移。

1.4.2 第二类导体—电解液

盐、酸、碱的溶液都属于这一类导体。正、负离子是这类导体的导电机构。在导电过程中，伴随有化学反应和质量迁移。

1.4.3 金属导体的电阻

金属导体电阻的大小决定于导体的材料的物理性质、几何形状和温度。导体的电阻用下式表示

$$R=\rho\frac{L}{S} \quad \Omega \tag{1.1.7-6}$$

式中，R为导体的电阻值，单位是Ω；ρ为材料的电阻系数，单位是Ω. mm²／m；L为导体的长度，单位是m；S为导体的横截面，单位是mm²。欧〔姆〕的符号用Ω来表示。

电阻的倒数称为电导G，单位是西〔门子〕，符号是S。

$$G=\frac{1}{R} \quad \mathrm{S} \tag{1.1.7-7}$$

1.4.4 电阻与温度的关系

绝大多数金属导体的电阻值随温度的升高而增大。碳、电解液和半导体的电阻则随温度

表 1.1.7-2 几种常用导体的电阻系数和电阻温度系数

材料名称	电阻系数ρ〔20℃〕(Ω·mm²／m)	电阻温度系数α (0～100℃)(1／℃)
铜	0.0175	0.004
铝	0.026	0.004
钨	0.049	0.004
铸铁	0.50	0.001
钢	0.13	0.006
碳	10.0	−0.0005
锰铜($Cu_{84}+Ni_4+Mn_{12}$)	0.42	0.000005
康铜($Cu_{60}+Ni_{40}$)	0.44	0.00005
镍铬铁($Ni_{66}+Cr_{15}+Fe_{19}$)	1.0	0.00013
铝铬铁($Al_5+Cr_{15}+Fe_{80}$)	1.2	0.00008

的升高而减小。导体电阻系数与温度的关系可用下式表示

$$\rho_2=\rho_1\ [1+\alpha\ (t_1-t_2)]\qquad(1.1.7\text{-}8)$$

式中，α称为电阻的温度系数；$\rho_1\rho_2$分别是当温度为$t^0{}_1C$和$t^0{}_2C$时的电阻系数值。表 1.1.7-2 列出几种常用导体的电阻系数和温度系数。某些合金，如表中的康铜和锰铜，它们的电阻温度系数特别小，但电阻系数却很大，适合于用来制造标准电阻器和仪表中的分流器等。另一些合金，如镍铬合金，具有很大的电阻系数，而且熔点很高，适合于制造电热器中的电阻丝等。

1.5 电介质

某些物质的内部，在正常情况下，几乎没有可以作自由运动的带电粒子，这些物质称为电介质（绝缘体)。在正常情况下，气体、一部分液体（矿物油、漆、树脂等）和除了金属以外的绝大多数固体都是绝缘体。

1.5.1 介质极化

当电场作用于电介质内部时，电介质内部就会产生对电场有影响的物理过程。在电场力作用下，原子中的电子会向着与电场相反方向相对于原子核作微观的位移，这种现象称为电介质的极化。介质极化的结果对电场起着削弱的作用，这种作用的强弱用物理量介电系数来表示。某些物质的相对介电系数见表 1.1.7-1。

1.5.2 介质击穿

当电介质内部的电场超过某一极限值时，电子就会被强场拉出而脱离原子核的约束，变成了自由电子。这时，电介质就变成了导体。这种现象称为电介质的击穿。这个电场强度的极限值称为击穿电场强度。电介质的击穿电场强度决定于很多因素，如材料及其纯度、加工情况、几何形状、温度和施加电压的持续时间等。

1.6 电容和电容器

1.6.1 电容器

被电介质隔开的两金属片或任何形状的金属导体的组合称为电容器。实际上各种类型的电容器都是按上述的概念制成的。除了作为元件的电容器外，两根平行的导线也可看作电容器，甚至一根导线也可看作电容器，这时，导线本身构成一个极板，大地则作为另一极板。

1.6.2 电容

在电容器两极板上若施加电压V，则两极板上就分别聚集有数量相等但符号相反的电荷量q，比值

$$C=q/V\qquad(1.1.7\text{-}9)$$

称为电容器的电容。单位是法拉(F)。实用上，法拉的单位太大，常用微法拉(μF)，微微法拉［$\mu\mu$F］作单位。

$$1\,F=10^6\mu F$$

$$1\,\mu F=10^6\mu\mu F$$

电容器的电容量决定于极板的形状、尺寸和极板间的电介质。电容器的耐压值是指电容器在短时间内(通常是 5 秒～ 1 分)所能承受而极板间电介质不被击穿的电压极限值。它通常指的是直流电压。电容器的额定工作电压约为耐压值的 50～70％。

电容器可以作串联或并联联结。联结后的等效电容值见表1.1.7-5。

1.7 静电感应

静电感应是导体在外电场中发生电荷重新分布的现象（图 1.1.7-1）。电荷重新分布的结果，被感应的导体内部静电场为零。但是从整体看，被感应的导体仍然是中性的。

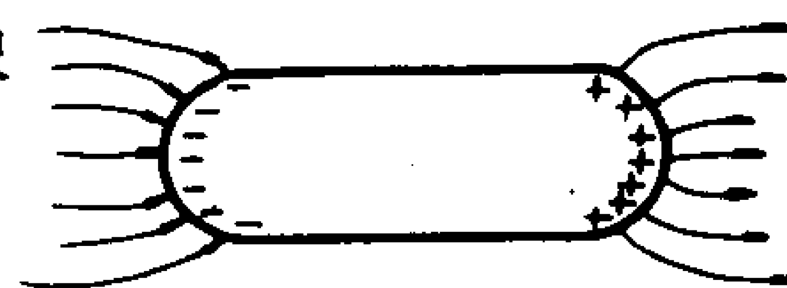


图 1.1.7-1 静电感应现象

1.8 静电屏蔽

将任意形状的空心导体壳置于静电场中，由于静电感应，感应电荷都分布在导体壳的外表面，壳腔内的静电场为零。所以，导体壳起了对外电场的屏蔽作用（图 1.1.7-2）。

若将一个带电体置于一个接地的导体壳中（图 1.1.7-3），则由于静电感应的作用，带电体的电力线中止在导体壳的内腔壁，壳外是设有带电体所产生的电场的。所以，接地的导体壳屏蔽了壳腔内带电体的电场对外界的影响。

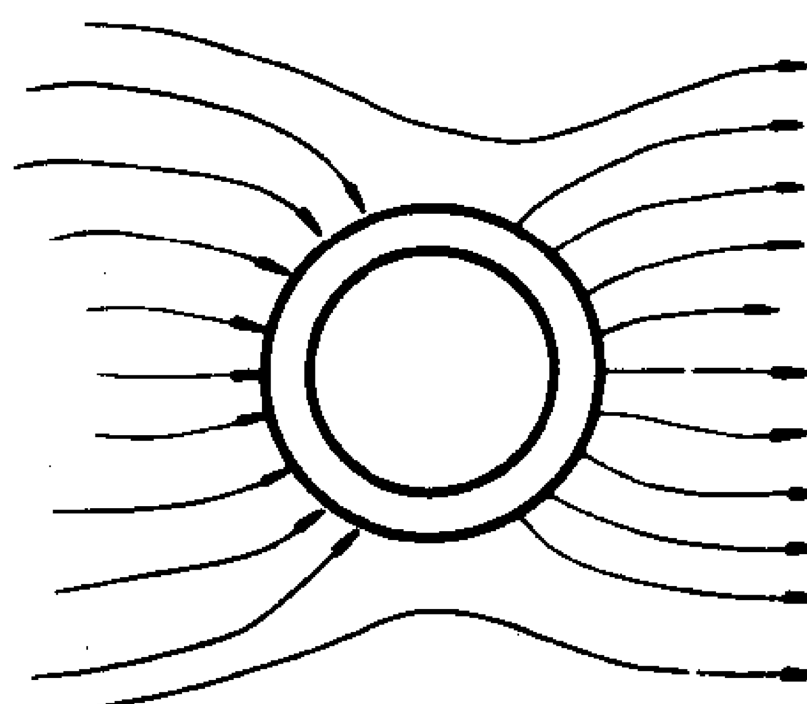


图 1.1.7-2 静电屏蔽

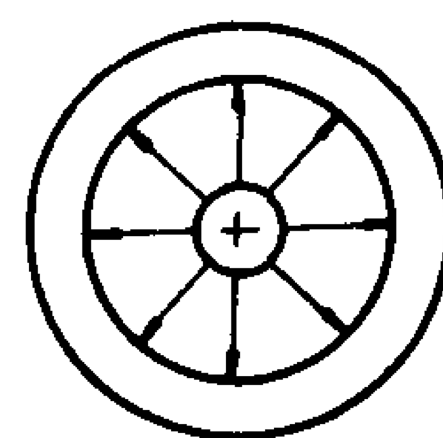


图 1.1.7-3 静电屏蔽

1.9 电流

带电粒子（电荷）在电场力的作用下，作有规则的运动称为电流。习惯上认定正电荷运动的方向作为电流的方向。因此，在金属导体中，由自由电子构成的运动方向是和习惯上认定的电流方向相反的。

1.9.1 电流强度

电流的强弱用电流强度i来表示。它等于单位时间内通过某一横截面的电荷量，即：

$$i=\frac{dq}{dt} \tag{1.1.7-10}$$

电流强度的单位是安〔培〕(A)；较小的单位用毫安(mA)，微安(μA)等。

$$1\,\text{mA}=10^{-3}\text{A}$$

$$1\,\mu\text{A}=10^{-3}\text{mA}$$

电流强度i是标量。习惯上，电流这一名词既指电流现象也指电流强度。

1.9.2 电流密度

若通过与场强方向相垂直的截面ds的电流为di，则

$$\delta=\frac{di}{ds} \tag{1.1.7-11}$$

称为该面积上的电流密度。电流密度是一矢量，方向与正电荷的运动方向一致。在载有直流电的导线中，可以认为各点的电流方向和大小都一致，于是$\delta=\frac{I}{S}$。

1.9.3 导体中的电流

金属导体中的电流是由自由电子构成的。它服从于欧姆定律，并且产生热效应。电解液导体中的电流则由正、负离子构成，在导电过程中，产生化学反应。

1.9.4 气体中的电流

通常情况下，气体分子是中性的，没有可供导电的粒子，是良好的绝缘体。但在外来因素的作用下，例如在火焰、紫外线、伦琴射线或放射性物质的射线等被称作为电离剂的作用

下，气体分子就会被电离，产生电子和正离子。这时，如果有外界电场的作用，气体中就会有电流。

1)被激导电　由于与电场无关的外界电离剂的不断作用，使气体电离而产生导电性，然而一旦电离剂停止作用，导电性立即消失者，称为气体的被激导电。

2)自激导电　即使没有外界电离剂的作用，气体中总还存在少量的电子和离子。若外界电场足够大，使得这些带电粒子获得足够的能量，那么它们在运动中和中性气体分子碰撞的结果，就会使中性分子电离，从而使气体产生导电性。这样的气体导电称为自激导电。弧光、电火花、电晕及辉光放电等都是自激导电的形式。

1.9.5　真空中的电流

在真空管中，例如在真空二极管中，阴极加热后能发射电子，称为热电子发射。若阳极的电位高于阴极，则电子在由阳极指向阴极的电场作用下，就源源不断地从阴极经过真空区域而到达阳极，形成了真空中的电流。

1.9.6　半导体中的电流(参看第8章)

1.10　电动势

电源的电动势是衡量电源将其它形式的能量(如机械能、化学能等)转化为电能的能力的一个物理量。它的数值等于单位正电荷在电源内部从低电位的一极移向高电位的另一极时，由其它形式的能量转化成电能的数值。在开路的情况下，电源的电动势在数值上等于电源的电压值。电动势的单位为伏〔特〕(V)。

1.11　接触电位差

当两种不同的金属相互接触时，接触面两边产生的电位差称为接触电位差。所有的第一类导体(金属)，可以排成一个序列，在这个序列中，任何一种金属，与它后面的金属相接触时，便带正电，后面的金属则带负电。这样的序列如下：

+铝、锌、锡、镉、铅、锑、铋、水银、铁、铜、银、金、铂、钯一。

如果将两个不同的金属联成一个闭合回路，若两处接触面的温度相同，虽然每一接触面处都有接触电位差，然而在回路中却互相抵销，不会有电流的。

1.12　温差电动势

将两种不同金属的导线联接成一闭合回路，当两个联接点处于不同的温度时，回路中就会有电动势(电流)产生，这样的电动势称为温差电动势。温差电动势的大小与两联接点温度之差成正比，并与所用的金属有关。温差电动势是不大的，例如由铋和锑组成的最强的热电偶，当温差为100℃时，温差电动势也只有0.01 V。常用的铂和铂铑温差电偶，短期可测量至1600℃的高温。镍铬一考铜温差电偶短期可测量至800℃，长期测量的温度范围为−200～600℃。铜一康铜组成的温差电偶，长期可测量温度的范围是−200～200℃，短期可测至300℃。

将若干个温差电偶串联起来，就构成了温差电堆(图1.1.7-4)。它有很高的灵敏度，可以测量出极微弱的温度变化，利用它可以测量幅射强度。

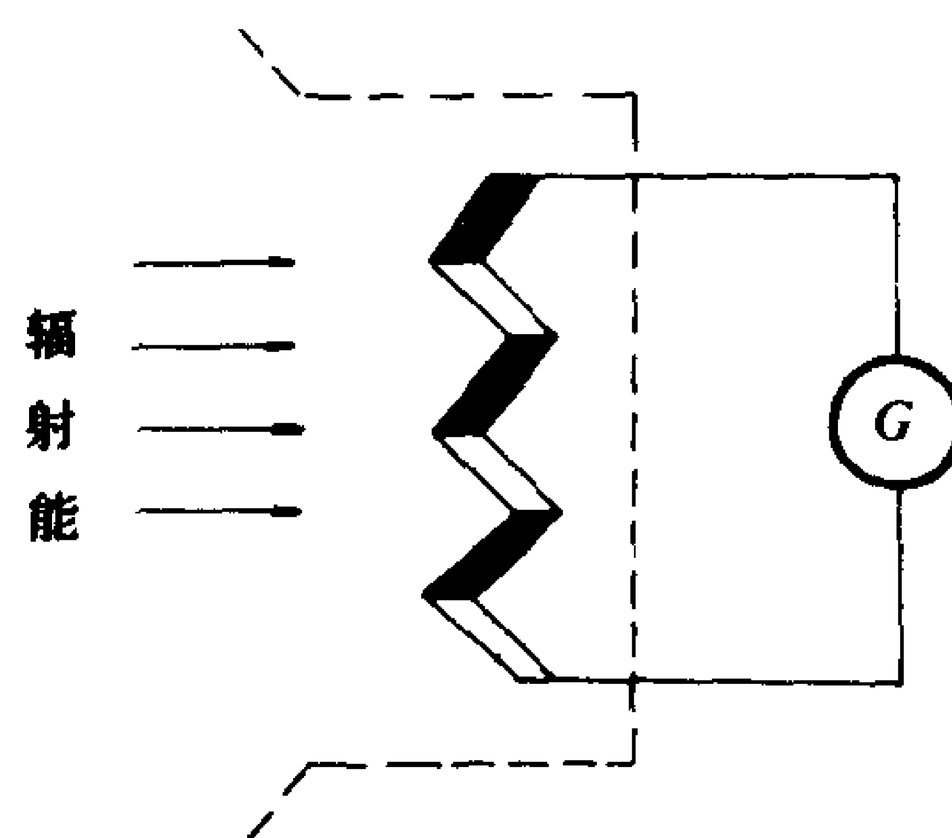


图1.1.7-4　温差电堆

1.13 压电效应

某些晶体，如石英、电气石、闪锌矿等，当这些晶体的表面沿着特定的方向受力而产生机械变形时，晶体的面就会带电。反之，如果这些晶体的两面加上电压，晶体将产生变形。这种在晶体中发生的机械能和电能相互转换的现象称为晶体的压电效应。能够产生压电效应的物体称为压电体。目前，应用很广的一种压电体是压电陶瓷。

1.14 霍耳效应

如果在通有电流I的导体或半导体片的法线方向上施以磁感强度为B的磁场，那么在垂直于电流和磁场的方向的两面上将产生电荷。这时两面间的电压V_H称为霍耳电压。这种现象称为霍耳效应(图 1.1.7-5)。霍耳电压的大小正比于电流强度I和磁感强度B的乘积，即：

$$V_H \propto I \cdot B \tag{1.1.7-12}$$

霍耳元件一般采用N型锗、锑化铟和钟化铟等半导体单晶材料制成。

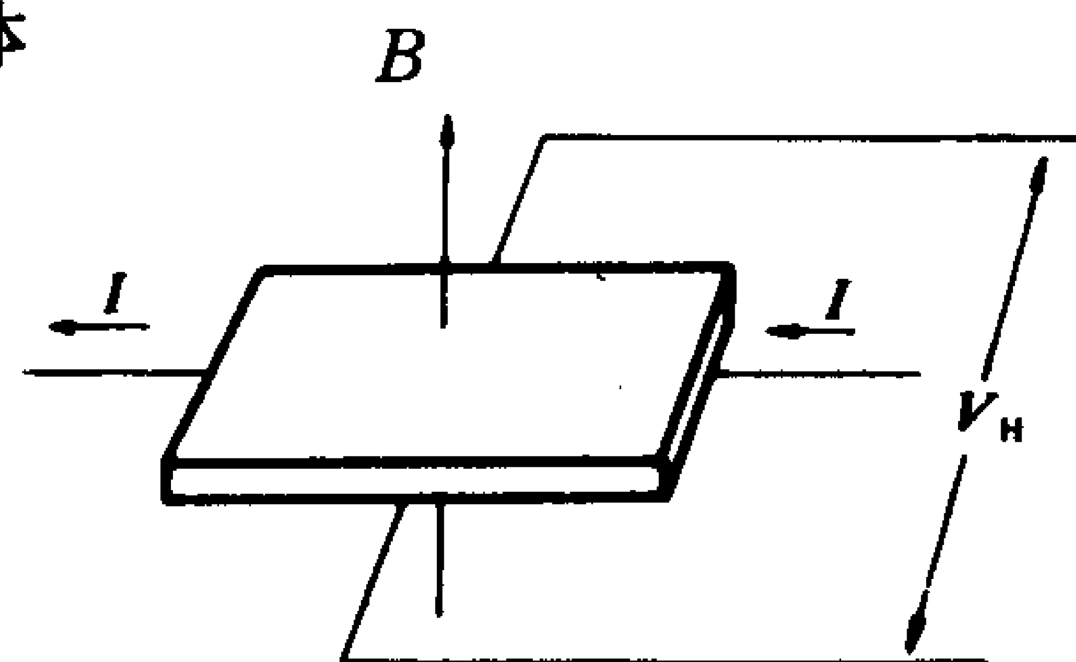


图 1.1.7-5 霍耳效应

2 电磁

2.1 电流的磁场

任何运动着的电荷或电流，除了和静止电荷一样地产生电场外，还在它的周围空间产生另一种特殊的场，称为磁场。磁场的重要特征是它对运动着的电荷或电流作用以力。在磁场中任意一点，自由悬挂着的磁针所取的方向（N极的指向），定义为该点磁场的方向。磁场中具有能量。

2.1.1 磁感应强度

磁感应强度B是表示磁场内某点的磁场强弱和方向的物理量，它是矢量，其方向就是磁场在该点的方向。

在国际单位制中，磁感应强度B的单位是特〔斯拉〕(T)，简称特。特斯拉也就是韦/米^2 (Wb／m^2)。此外，也常用电磁单位制，称为高斯(GS)。

$$1\,\mathrm{T} = 1\,\mathrm{Wb/m^2} = 10^4\,\mathrm{GS}$$

2.1.2 磁力线

为了形象地描绘磁场，引入磁力线的概念。磁场中磁力线的分布应该是这样的：磁力线上每一点的切线方向应与该点磁场的方向相吻合，并且规定在垂直于磁力线的平面上，单位面积所通过的磁力线数，应等于磁感应强度B。磁力线是闭合的空间曲线。

2.1.3 磁通量

在磁场中，穿过某一面积的磁力线数，称为该面积的磁通量，简称磁通ϕ。

若面积S垂直于均匀磁场B，则该面积中的磁通为

$$\phi = B \cdot S \tag{1.1.7-13}$$

在任意磁场中，可以将ϕ表示为磁感应强度矢量的面积分，即：

$$\phi = \int_S \bar{B} d\bar{S} \tag{1.1.7-14}$$

在国际单位制中，磁通的单位是伏·秒(V·S)，称为韦伯〔Wb〕，简称韦。在电磁单位制

中，磁通的单位是马克斯韦(Mx)，简称马。

$$1\,\mathrm{Wb}=10^8\mathrm{Mx}$$

2.1.4 磁场强度

在磁路的计算中，采用一个称为磁场强度H的辅助量，它不计及磁媒介质的磁性对磁场的影响，只考虑电流的大小和导体的形状对磁场大小的影响。磁场强度H也是矢量，它和磁感应强度矢量的关系是

$$\bar{B}=\mu\bar{H} \tag{1.1.7-15}$$

式中，μ是磁介质的导磁系数。磁场强度的单位用A/m。

2.1.5 右螺旋定则

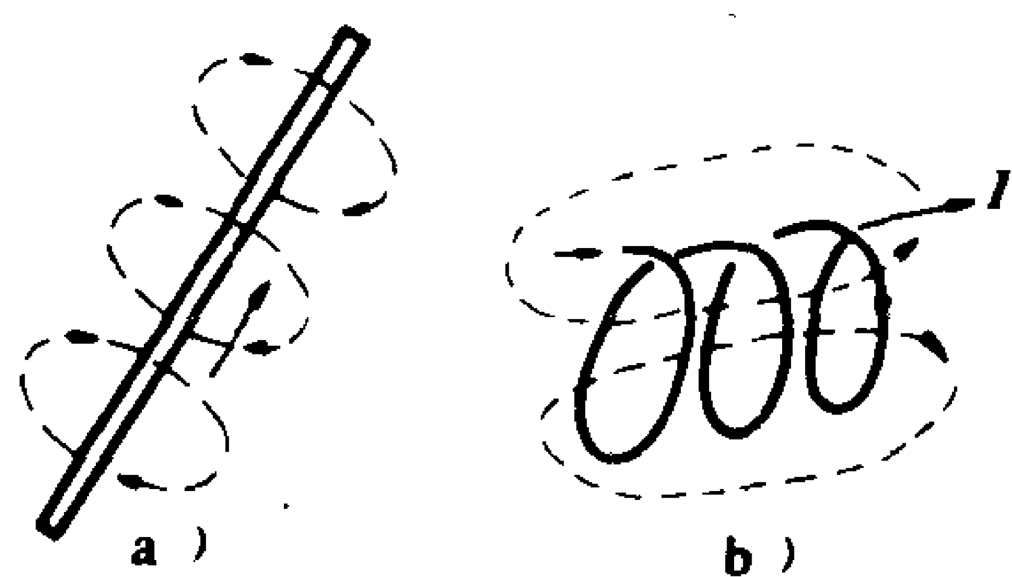


图 1.1.7-6 右螺旋定则

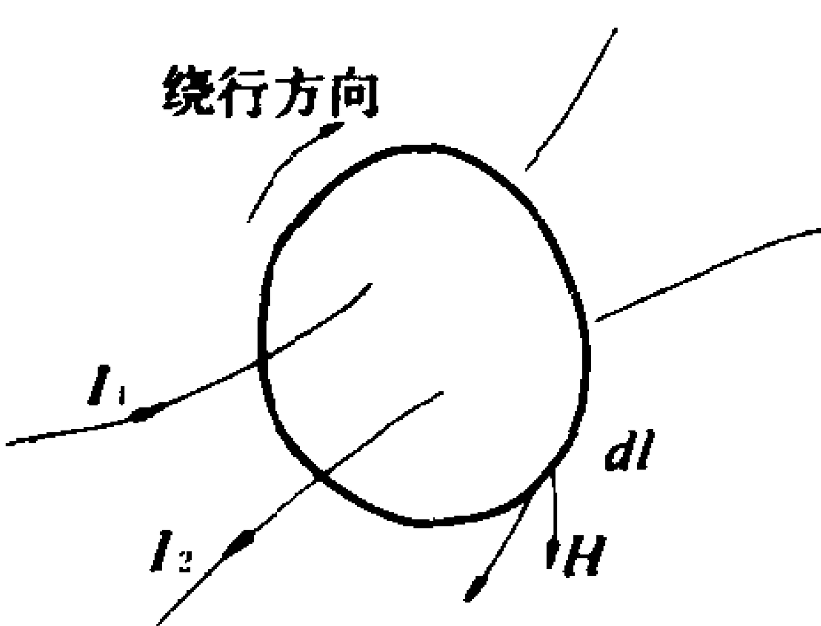


图 1.1.7-7 全电流定律

通有电流的直导线，在它周围的磁力线有着以导线为轴心的同心圆形状。磁场的方向与电流的方向之间的关系可确定如下：当右螺钻前进的方向与导线中电流的方向一致时，螺钻旋转的方向表示着磁力线上磁场的方向(图 1.1.7-6 a)。若导体是一线圈，则当线圈中电流的绕行方向与螺钻旋转的方向一致时，螺钻前进的方向就是线圈中磁场的方向(图 1.1.7-6 b)。

2.1.6 全电流定律

全电流定律也称安培环路定律。它的表达式是

$$\oint\bar{H}d\bar{l}=\sum I \tag{1.1.7-16}$$

该式说明：磁场强度矢量$\bar{H}$沿任意闭合回线的线积分，等于穿过此回线所围成的面的电流的代数和(图 1.1.7-7)。式中，电流的正负要看它的方向与回线所选定的绕行方向是否符合右螺旋定则而定。图中，I_1应取正号，I_2应取负号。

2.1.7 磁场对载电流导体的作用力

在磁场中，载流导体会受到作用力，称为电磁力。电磁力F的大小可用下式表示。

$$F=B\cdot l\cdot I\cdot \mathrm{Sin}\theta \tag{1.1.7-17}$$

式中，磁感强度B的单位是T或N／(A·m)，长度l为m，电流I为A，电磁力F的单位则为N·θ是电流方向与磁感强度B的方向之间的夹角(图 1.1.7-8)。

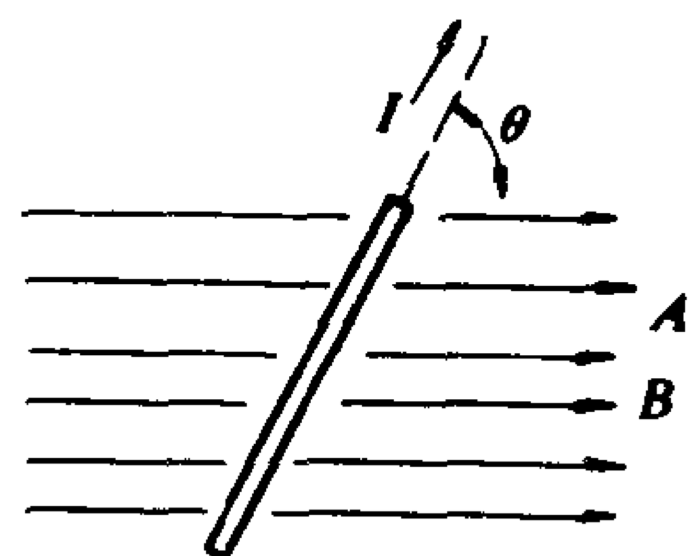


图 1.1.7-8
磁场对载流导体的作用力

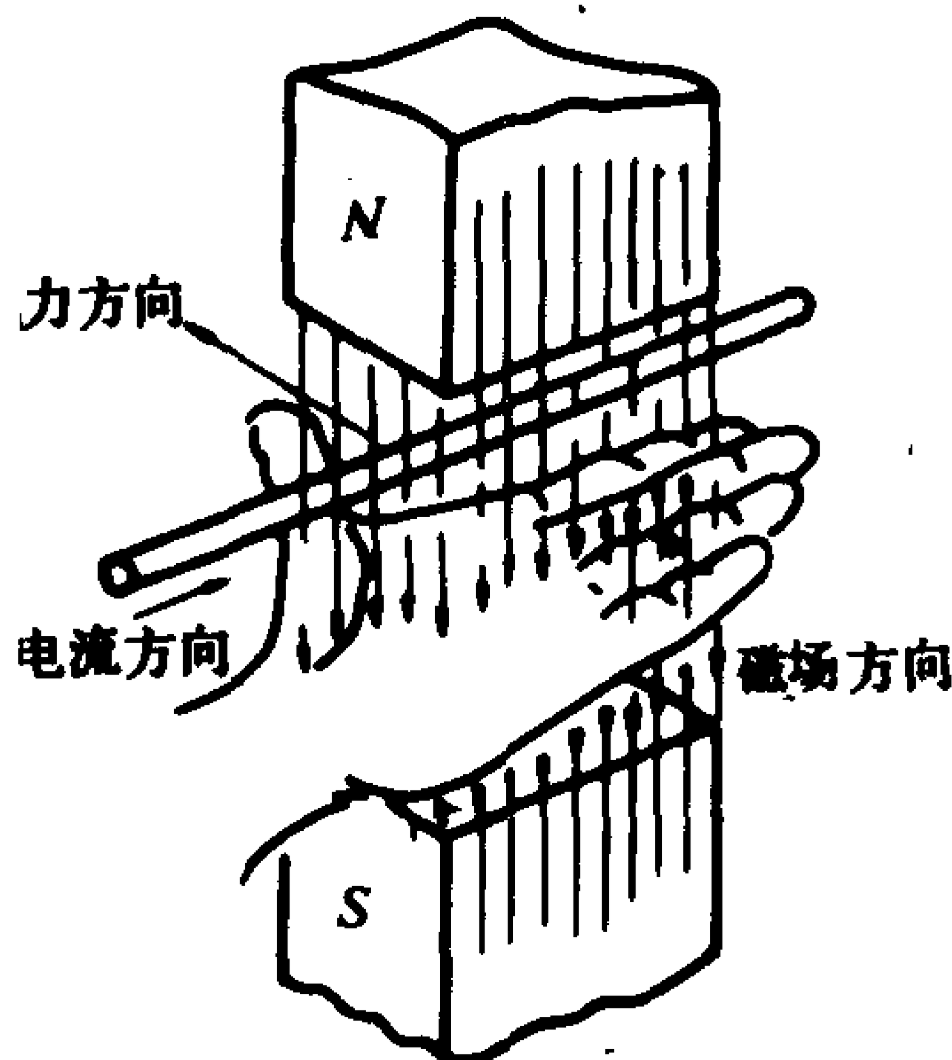


图 1.1.7-9 左手定则

2.1.8 左手定则

左手定则规定：伸开左手，让磁场穿过掌心，并将伸直的四个手指指向电流的方向，则拇指所指的方向就是导线受力的方向(图 1.1.7-9)。

2.1.9 磁场中的能量

磁场中储存有能量，单位体积内

的磁场能量或能量密度为：

$$W=\frac{1}{2}B\cdot H \tag{1.1.7-18}$$

2.2 电磁感应现象

电场和磁场是在它们变化的过程中互相联系起来的。电磁感应就是变化的磁场产生电场的现象。

2.2.1 法拉弟电磁感应定律

该定律指出：当穿过一闭合线圈(回路)的磁通发生变化时，在线圈中感生电动势，从而引起电流。这个电动势称为感应电动势。

单匝线圈中的感应电动势可表示为：

$$e=-\frac{d\phi}{dt} \tag{1.1.7-19}$$

若线圈的匝数为N，而且磁通ϕ穿链所有的N匝线圈，则感应电动势为：

$$e=-N\frac{d\phi}{dt}=-\frac{d\psi}{dt} \tag{1.1.7-20}$$

式中，$\psi=N\phi$称为线圈的磁链。负号则是为了正确地表达感应电动势在线圈（回路）中的方向而引入的。

2.2.2 直线导体中的感应电动势

若一根直长导体置于均匀磁场中，并与磁场有相对的割切运动，则该导体中的感应电动势为：

$$e=Blv \tag{1.1.7-21}$$

式中，B为均匀磁场的磁感强度(Wb/m²)，l为导体垂直于磁场方向的有效长度(m)，v为导体相对于磁场的垂直割切速度(m/s)，e为感应电动势(V)。

公式(1.1.7-19)与(1.1.7-21)虽然形式上不同，但物理本质是一样的。

2.2.3 楞次定律

该定律指出：感应电动势在回路中的方向，总是反对原来磁通的变化。

如果按右螺旋定则来规定磁通ϕ和感应电动势e的正方向（图 1.1.7-10)，那么就可以根

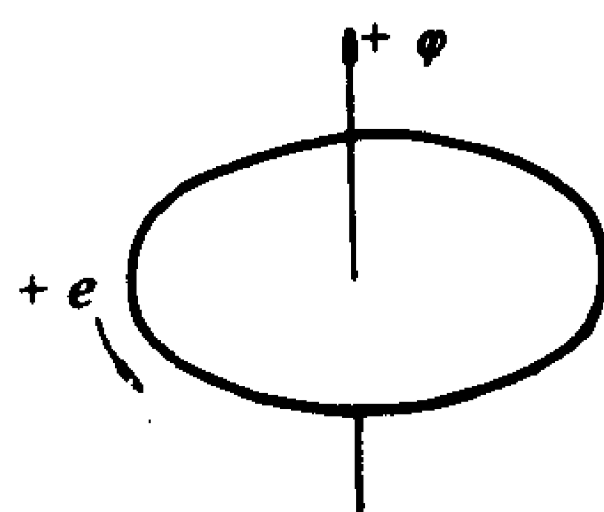


图 1.1.7-10 按右螺旋定则规定e和ϕ的正方向

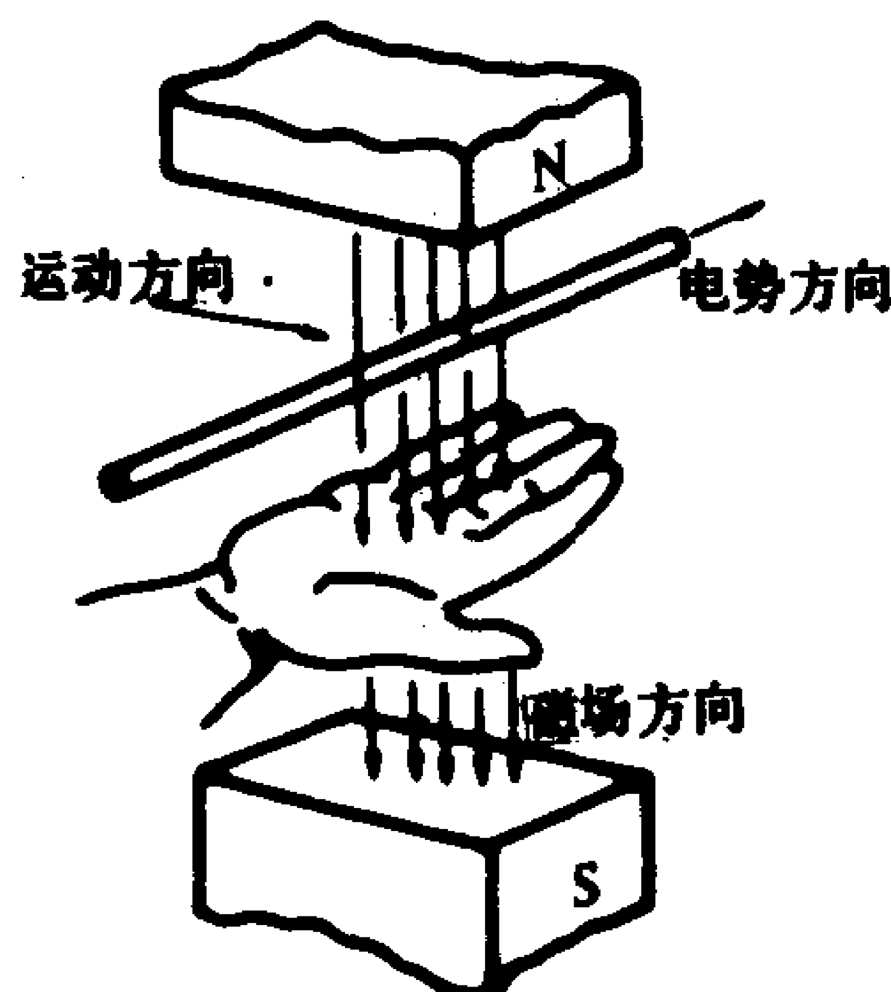


图 1.1.7-11 右手定则

据公式(1.1.7-19～20)中e的正负号来确定它在回路中某一瞬间的真实方向。

2.2.4 右手定则

该定则用来确定直长导体中感应电动势的方向，是楞次定律的一种特殊表达方式。右手定则规定：若让磁力线垂直地指向掌心，并将伸直的拇指指向导体割切磁力线的方向，则伸直的其余四指的指向就是导体中感应电动势的方向(图1.1.7-11)。

2.2.5 自感

在任一回路中，若因其自身电流有变化而引起与此回路相链的磁通发生相应的变化，因此而感应的电动势称为自感电动势。自感电动势可表示为

$$e_L = -L\frac{di}{dt} \tag{1.1.7-22}$$

式中，L称为该回路的电感或自感系数，单位为亨(H)。根据楞次定律，自感电势的方向，总是反对引起自感电动势的电流的变化。当取回路中电流的正方向与自感电动势的正方向相同的条件下，上式中e_L的正负号将正确反映它的真实方向。

2.2.6 互感

如果某一回路(线圈)中的电流所产生的磁通，不仅与它自身相连，而且这磁通的全部或一部分还与另一回路(线圈)相连，则这两个回路(线圈)称为耦合回路。当磁耦合回路中的一个回路中的电流发生变化时，在另一回路中感生的感应电动势称为互感电动势(图1.1.7-12)。

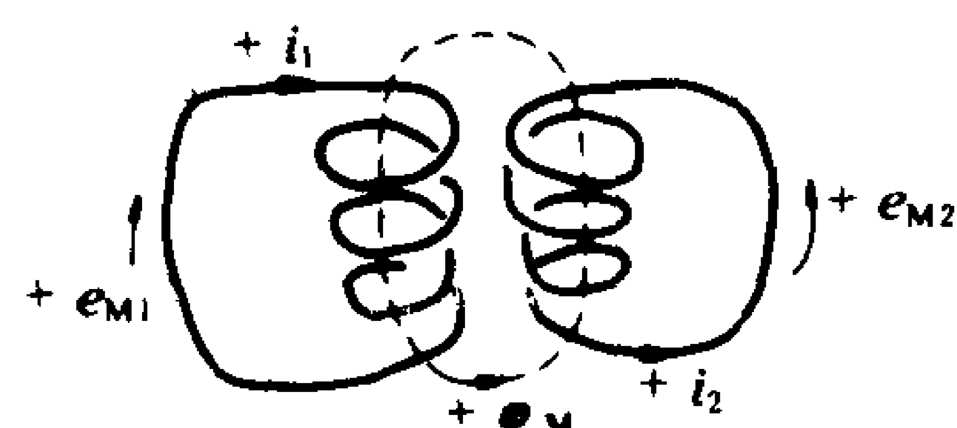


图1.1.7-12 互感现象

两个回路中的互感电动势可表示如下：

$$e_{M1} = -M\frac{di_2}{dt}$$
$$e_{M2} = -M\frac{di_1}{dt} \tag{1.1.7-23}$$

式中，e_{M1}是第2回路中的电流i_2变化时，在第1回路中感生的电动势。e_{M2}是第1回路中的电流i_1变化时，在第2回路中感生的电动势。系数M称为互感系数，单位为亨(H)。M可为正，也可为负。确定正、负的原则是，应使式e_M的代数符号能够正确地反映楞次定律。若规定各自回路中的e_M与i的正方向相同，并且当i_1和i_2同符号时，两者产生的磁通在公共磁路中相互加强者，M取正号，反之应取负号。

2.2.7 涡流

根据电磁感应定律，如果有一变化着的磁通穿过一块铁体（或其它导体)，那么在这一整块的铁心中也会有感应电动势，从而产生感应电流。这种自成闭合回路的环流称为涡流(图1.1.7-13)。涡流的环行方向和它所取的面，总是反对原来磁通的变化。

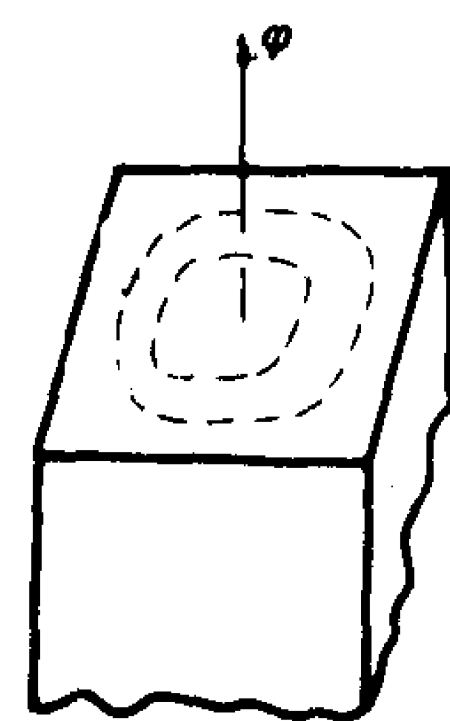


图1.1.7-13 涡流

2.2.8 集肤效应

一根导线通过直流电流时，电流在导线截面中的分布是均匀的，但当通过交流电流时则有所不同。由于电磁感应的结果，愈接近导线表面，电流密度愈大。这种交流电流趋向表面分布的现象称为集肤效应。其结果使导线的有效电阻增大，这在高频电路中尤为显著。

3 电路基础知识

3.1 电路与电路图

电路就是电流流经的路径。其主要功能是传递信号和传输电能。电路一般由电源(或信号源)、用电装置(称为负载)和联接导线组成。

在电路的分析和计算中，用电路图代替实际的电路。在电路图中，用理想的集中参数的元件来代替实际的元件。例如电阻器用电阻R代替、电感器用电感L或RL串联的电路代替，电容器用电容C代替等。所以，电路图是实际电路的一种模型。由于每一个理想元件都有着可以用数学表示或近似表示的伏安特性，所以一旦电路图的联接方式和元件确定后，整个电路的特性也就被确定下来，并可用数学方程来描述。在电工技术中，电路这一术语也指电路图。

3.2 理想元件的电特性

参看表1.1.7-3。

表1.1.7-3　R、L、C的伏安特性

	电阻 R	电容 C	电感 L
符　号	i → v_R →	i → v_C →	i → v_L →
参数定义	$R=v_R/i$	$C=q/v_C$	$L=\psi/i$
伏安特性	$v_R=iR$	$i_C=C\frac{dv_C}{dt}$	$v_L=L\frac{di}{dt}$

3.3 电路分类

一般说来，电路可按其特点分类。

3.3.1 按组成电路元件的特性分类

有线性电路和非线性电路两大类。当通过电路元件R、L、C的输入量与输出量成线性关系时，称为线性电路，否则称为非线性电路。

3.3.2 按电路长度与电流波长相比分类

有集中参数电路和分布参数电路。前者，电路长度比波长短得多，后者则可与波长相当甚至比波长还长。

3.3.3 按电流的波形来分类。

有直流、正弦交流、非正弦交流、脉冲电路等。

3.4 电源

能够向电路提供电能或信号的元件统称为电源。

3.4.1 电压源

一个电源，若其外特性表示为如式(1.1.7-24)的形式，则这个电源称为电压源。

$$v(t)=e(t)-r_0 i(t) \tag{1.1.7-24}$$

式中，$v(t)$是电源的输出电压，$e(t)$是电源的电动势，$i(t)$是流经电源的电流，r_0是电源的内阻。

根据式(1.1.7-24)，可画出代表电压源的电路如图 1.1.7-14 所示。若r_0为零，该电源称为理想电压源或恒压源。

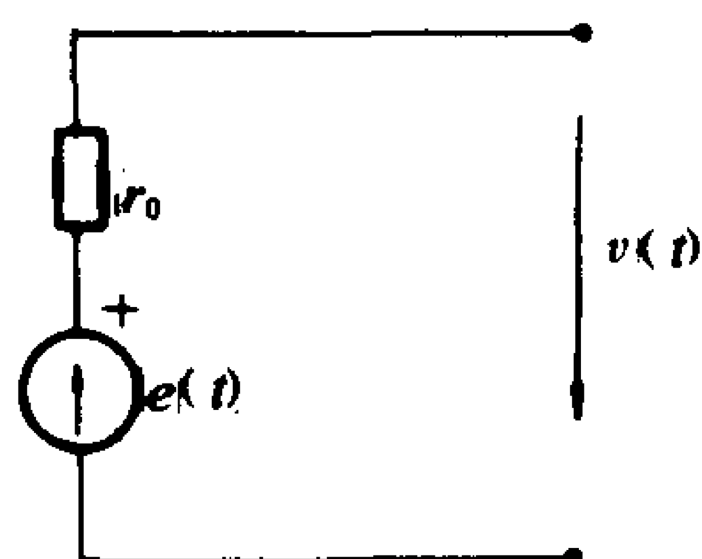


图 1.1.7-14 电压源的电路模型

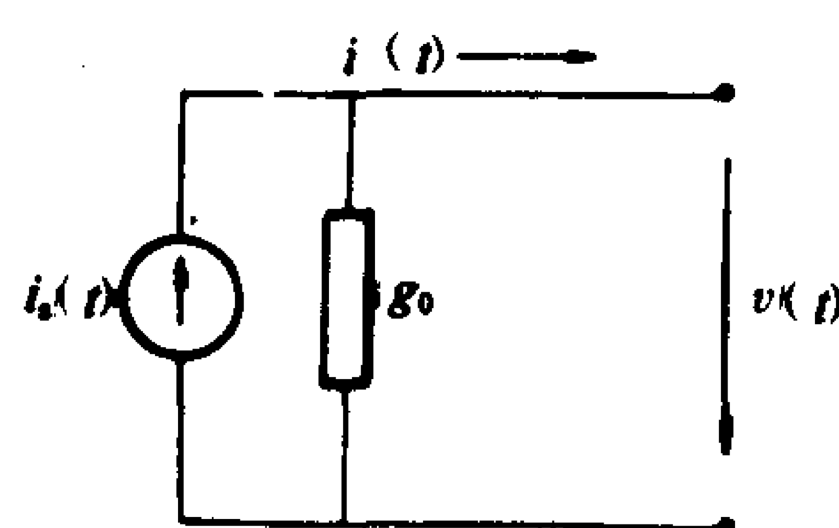


图 1.1.7-15 电流源的电路模型

3.4.2 电流源

若电源的外特性表示为如式(1.1.7-25)的形式，该电源称为电流源。

$$i(t)=i_s(t)-g_0 v(t) \qquad (1.1.7\text{-}25)$$

式中，$i(t)$是电流源的输出电流，$i_s(t)$是电流源的源电流，$v(t)$是电流源的端电压，g_0是电流源的电导。

根据式(1.1.7-25)，可画出代表电流源的电路如图 1.1.7-15 所示。若电流源的电导g_0为零，则称为理想电流源或恒流源。

3.4.3 电压源与电流源的等效互换

一个实际的电源，根据需要，既可以用电压源也可以用与它等效的电流源来表示。它们之间的关系是：

$$i_s(t)=e(t)/r_0 \qquad (1.1.7\text{-}26)$$

$$g_0=1/r_0 \qquad (1.1.7\text{-}27)$$

3.4.4 受控源

电压源中的电动势或电流源中的源电流，如果受控于其它支路中的电流或电压，则称为受控电源。受控源可以有四种形式：电流控制电流源(*CCCS*)，电流控制电压源(*CCVS*)，电压控制电流源(*VCCS*)，和电压控制电压源(*VCVS*)。图 1.1.7-16 示出这四种受控源的电路模型，其中，α，g_m，μ和r_m均为比例常数。

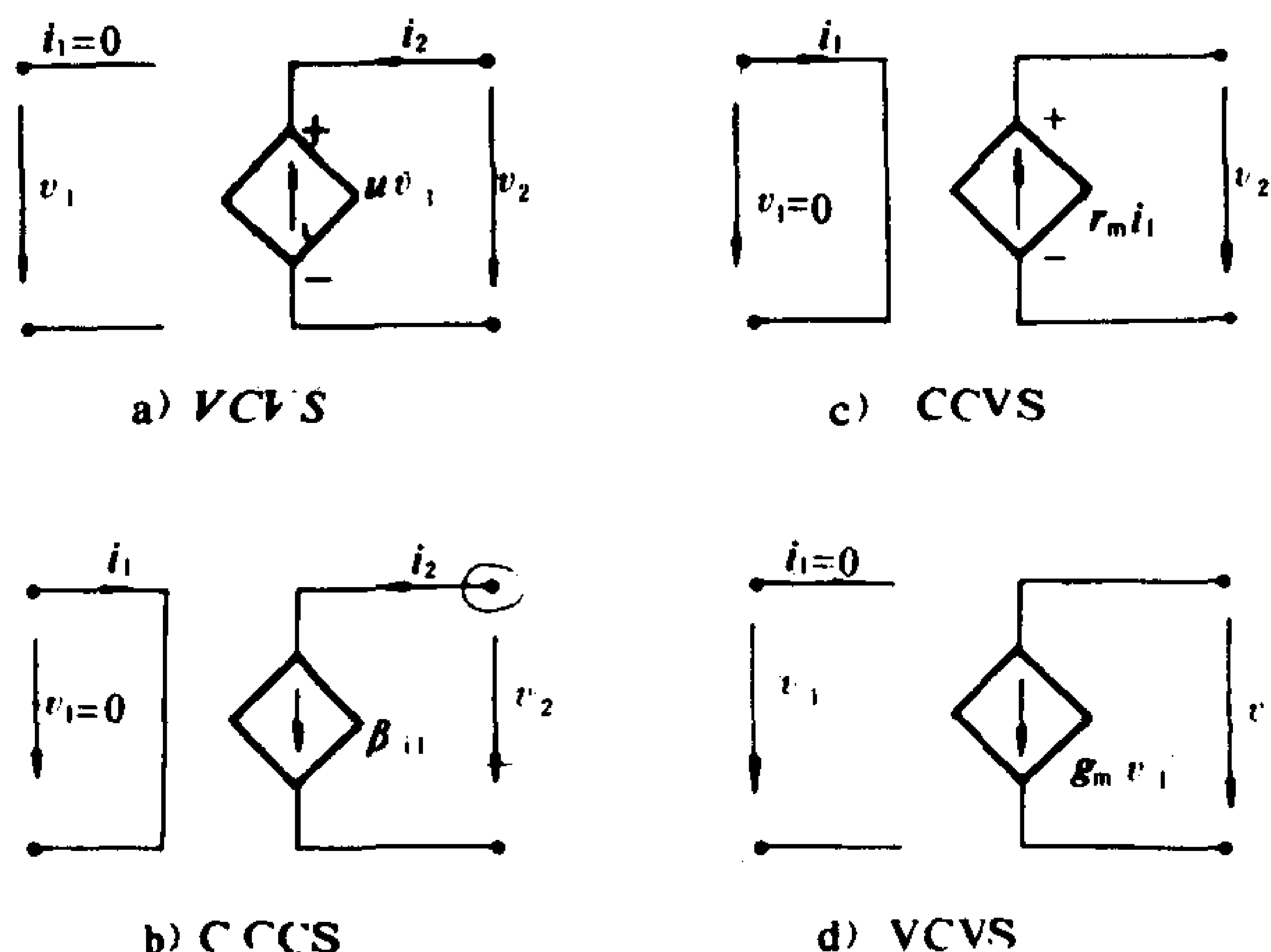


图 1.1.7-16 受控源的电路模型

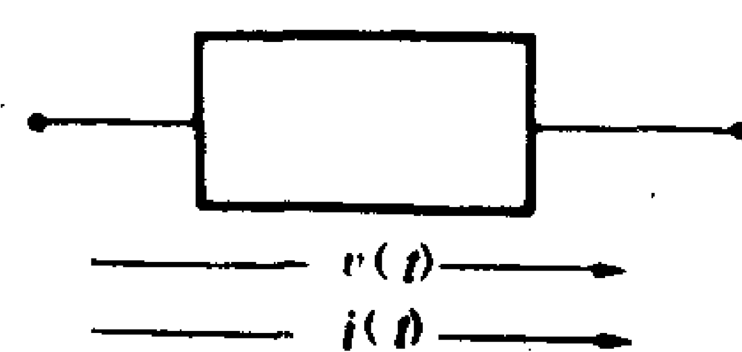


图 1.1.7-17 电路的电功率

3.5 欧姆定律

欧姆定律指出：对于线性电阻元件，元件上的电压$v(t)$与通过元件的电流$i(t)$成正比，即：

$$v(t)=R\cdot i(t) \qquad (1.1.7\text{-}28)$$

3.6 电功率

若支路两端的电压为$v(t)$，流过支路的电流为$i(t)$(图 1.1.7-17)，则支路的电功率为：

$$p=v(t)\cdot i(t) \qquad (1.1.7\text{-}29)$$

在图 1.1.7-17 中，方框内可以是任意的元件。若框内是纯电阻性元件，则上式可写成

$$p=i^2(t)\cdot R \qquad (1.1.7\text{-}30)$$

3.7 电流和电压的正方向

对于电压、电流等具有两个方向的物理量，可以用它们的代数量来表示它们的两个方向。任意选定支路中电流、电压的一个方向为正值的方向，则相反的方向就是负值的方向。电流、电压正值的方向称为正方向或参考方向。正方向可用箭头或双下标来表示(图 1.1.7-18)。如果电流的正方向选定从a至b，则可写成i_{ab}。显然$i_{ab}=-i_{ba}$。同理，如选定电压的正方向是从a至b，则写成v_{ab}。同样，$v_{ab}=-v_{ba}$。

在电路计算中，电压、电流的正方向是可以任意选定的。计算用的公式或方程中各项的代数符号都与选定的正方向有关。例如欧姆定律，若选定电流的正方向与电压的正方向相反，则式(1.1.7-28)应写成$v(t)=-R\cdot i(t)$。

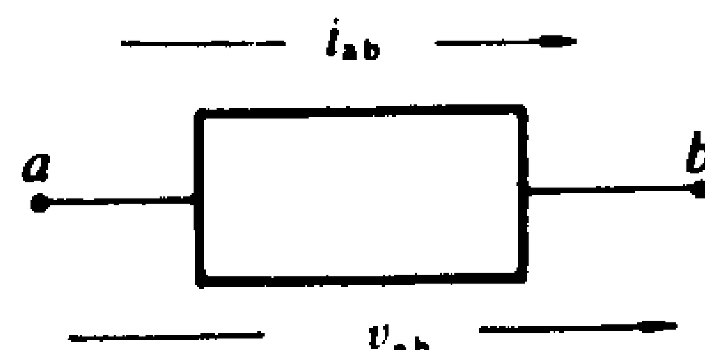


图 1.1.7-18
电流和电压正方向的表示法

3.8 克希荷夫定律

该定律反映了复杂电路中，电流和电压各自所必须遵循的约束关系。它不仅适用于线性电路，也适用于非线性电路。就是说，它的正确性与电路元件的性质无关。

3.8.1 克希荷夫电流定律(KCL)

定律指出，对任一集中参数电路中的任一节点来说，流入节点的电流代数和为零。

所谓代数和，是指若规定电流的方向指向节点时为正，则流出节点时为负。

对于任一时刻，KCL可写成

$$\sum i(t)=0 \qquad (1.1.7\text{-}31)$$

若为直流，则上式可写成

$$\sum I=0 \qquad (1.1.7\text{-}32)$$

若为正弦交流电流，则KCL的相量形式为

$$\sum \dot{I}=0 \qquad (1.1.7\text{-}33)$$

3.8.2 克希荷夫电压定律(KVL)

定律指出，在任一时刻，沿着回路绕行一周，所有支路的电压降的代数和为零，即:

$$\sum V(t)=0 \qquad (1.1.7\text{-}34)$$

式中，当电压降的方向与回路的环行方向一致时，取正号，反之取负号。

对于直流电路，KVL可写成

$$\sum V=0 \qquad (1.1.7\text{-}35)$$

对于正弦交流电路，KVL的相量形式是

$$\sum \dot{V}=0 \qquad (1.1.7\text{-}36)$$

3.9 正弦交流电

时间按正弦规律变化的电流、电压和电动势统称为正弦交流电，其三角函数表示式可写成

$$f(t)=A_m\sin(2\pi ft+\varphi) \qquad (1.1.7\text{-}37)$$

图 1.1.7-19 是正弦交流电的波形

3.9.1 正弦交流电的瞬时值

它是指正弦交流电在某一指定瞬时的数值(代数量)。电流、电压和电动势的瞬时值$f(t)$分别用i、v和e表示。

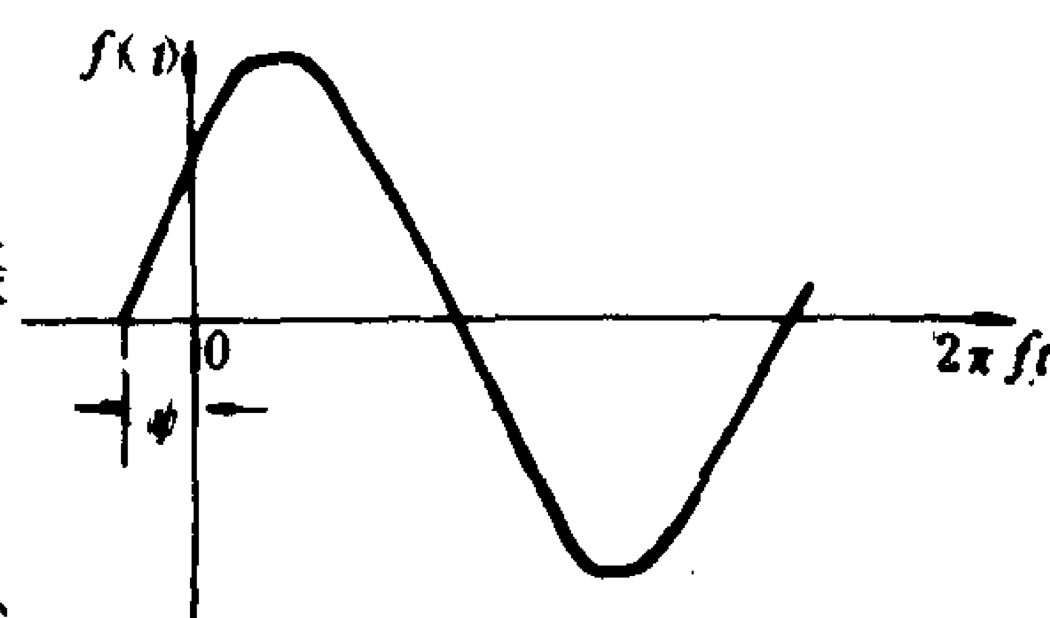


图 1.1.7-19 正弦交流电的波形

3.9.2 正弦交流电的振幅

振幅又称极大值或最大值。式(1.1.7-37)中的A_m即为振幅。电流、电压和电动势的振幅分别用I_m、V_m和E_m表示。

3.9.3 正弦交流电的周期

正弦交流电交变一次所需要的时间称为周期T，单位为秒(s)。

3.9.4 正弦交流电的频率和角频率

在单位时间内，某一正弦交流电所历经的周期数称为频率f，单位为赫(Hz)。$\omega=2\pi f$则称为角频率，单位为弧度/秒(rad/s)。

周期与频率的关系是

$$f=\frac{1}{T} \tag{1.1.7-38}$$

3.9.5 相位、初相、相位差

在式(1.1.7-37)中，角度$(2\pi ft+\psi)$称为正弦交流电的相位角，简称相位。当$t=0$时，决定瞬时值$f(t_0)$的相位角ψ称为初相角，简称初相。两个同频率正弦交流电初相角之差称为相位差。

3.9.6 超前和滞后

一般说来，在交流电路中，两个或两个以上的正弦量依次到达正最大值的时间是不同的，设两正弦量分别为

$$f_1(t)=A_{1m}\sin(\omega t+\varphi_1)$$
$$f_2(t)=A_{2m}\sin(\omega t+\varphi_2)$$

若$\varphi_1>\varphi_2$，则$f_1(t)$较之$f_2(t)$先到达正最大值，则称$f_1(t)$超前于$f_2(t)$一个角度$\alpha=\varphi_1-\varphi_2$，或者说，$f_2(t)$滞后于$f_1(t)$ α角度。

3.9.7 正弦交流电的有效值

有效值是根据电流热效应来衡量正弦交流电强度的一个物理量。正弦交流电流有效值的定义是

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt} \tag{1.1.7-39}$$

正弦交流电压V和电动势E的有效值定义同式(1.1.7-39)。这个定义不但适用于正弦交流电，也适用于周期性非正弦交流电。有效值也称实效值或均方根值。

正弦交流电流、电压和电动势的有效值与振幅的关系为

$$\begin{aligned}I_m&=\sqrt{2}I\\V_m&=\sqrt{2}V\\E_m&=\sqrt{2}E\end{aligned} \tag{1.1.7-40}$$

3.10 周期性非正弦交流电

在电工技术中，常见的周期性非正弦交流电，一般都可以展开成傅里叶三角级数。这样，就可以利用叠加原理并按正弦交流电的计算方法来进行非正弦交流电路的计算。

3.10.1 周期性函数的傅里叶级数表示式

设$f(t)$为一周期性非正弦函数，其周期为T，角频率为$\omega=2\pi/T$，则$f(t)$可表示为

$$f(t)=\frac{1}{2}a_0+\sum_{k=1}^{\infty}(a_k\cos k\omega t+b_k\sin k\omega t)$$
$$=A_0+\sum_{k=1}^{\infty}A_k\sin(k\omega t+\varphi_k) \qquad (1.1.7\text{-}41)$$

式中，$A_0=\frac{1}{2}a_0$是$f(t)$的恒定分量或称直流分量，它是$f(t)$在一个周期中的平均值。$A_1\sin(\omega t+\varphi_1)$项的频率与$f(t)$的频率相同，称为$f(t)$的基波或一次谐波。$A_2\sin(2\omega t+\varphi_2)$项的频率为基波频率的两倍，称为二次谐波。余类推。二次及二次以上的谐波称为高次谐波。通常还将K为奇数的各项称为奇次谐波，K为偶数的各项称为偶次谐波。

由于傅里叶级数的收敛性，一般说来，谐波的次数愈高，它的振幅就愈小。故在分析计算中，有时往往将高次谐波予以忽略。

3.10.2 傅里叶级数中各项系数的确定

各项系数可由下列各式确定

$$\left.\begin{aligned}
a_0&=\frac{2}{T}\int_0^T f(t)\,dt\\
a_k&=\frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos k\omega t\,dt \quad k=1,2,3\cdots\\
b_k&=\frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin k\omega t dt \quad k=1,2,3\cdots\\
A_0&=\frac{1}{2}a_0\\
A_k&=\sqrt{a^2{}_k+b^2{}_k}\\
\varphi_k&=tg^{-1}\frac{a_k}{b_k}\\
a_k&=A_k\sin\varphi_k\\
b_k&=A_k\cos\varphi_k
\end{aligned}\right\} \qquad (1.1.7\text{-}42)$$

根据波形的对称性，可以判断级数中不含哪些谐波分量：

横轴上下面积不相等者，含直流分量；

对称于纵轴者，不含正弦项谐波分量；

对称于原点者，不含直流分量和余弦项谐波分量；

对称于横轴者，不含直流分量和偶次谐波分量，只含奇次谐波分量。

表1.1.7-4示出几种常见的周期性非正弦波的傅里叶级数表示式。

表 1.1.7-4　　　　　　　　几种常见波形的傅里叶级数表示式

顺序	名　称	波　形	谐 波 分 量 表 示 式
1	方形波		$f(t)=\frac{4A}{\pi}(\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\frac{1}{5}\sin 5\omega t+\cdots)$
2	等腰三角波		$f(t)=\frac{8A}{\pi^2}(\sin\omega t-\frac{1}{9}\sin 3\omega t+\frac{1}{25}\sin 5\omega t-\cdots)$
3	锯齿波		$f(t)=\frac{A}{2}-\frac{A}{\pi}(\sin 2\omega t+\frac{1}{2}\sin 4\omega t+\frac{1}{3}\sin 6\omega t+\cdots)$
4	正弦整流全波		$f(t)=\frac{4A}{\pi}(\frac{1}{2}-\frac{1}{3}\cos 2\omega t-\frac{1}{15}\cos 4\omega t-\frac{1}{35}\cos 6\omega t\cdots)$
5	方形脉冲		$f(t)=\frac{\tau A}{T}+\frac{2A}{\pi}(\sin\frac{\tau\pi}{T}\cos\omega t+\frac{1}{2}\sin\frac{2\tau\pi}{T}\cos 2\omega t+\frac{1}{3}\sin\frac{3\tau\pi}{T}\cos 3\omega t+\cdots)$
6	正弦整流半波		$f(t)=\frac{2A}{\pi}(\frac{1}{2}+\frac{\pi}{4}\sin\omega t-\frac{1}{3}\cos 2\omega t-\frac{1}{15}\cos 4\omega t\cdots)$

3.10.3　周期性非正弦交流电的有效值

周期性非正弦电流的有效值等于它的直流分量的平方与各次谐波电流有效值的平方和的方根，即

$$I=\sqrt{I^2_0+I^2_1+I^2_2+\cdots I^2_k} \tag{1.1.7-43}$$

式中，I_0为直流分量，I_1、I_2…分别为基波、二次谐波…K次谐波的电流有效值。

周期性非正弦电压、电动势有效值的基本概念与电流有效值相同。

3.10.4　周期性非正弦交流电功率

在非正弦交流电路中，同频率的电流和电压相互作用才产生平均（有功）功率。总的有功功率为

$$P=V_0I_0+\sum_{k=1}^{\infty}V_kI_k\cos\varphi_k \tag{1.1.7-44}$$

式中，V_0I_0为直流电功率，$V_kI_k\cos\varphi_k$为第K项谐波的有功功率。

非正弦交流电路的无功功率定义为各次谐波无功功率之和，即

$$Q=\sum_{k=1}^{\infty}V_kI_k\sin\varphi_k \tag{1.1.7-45}$$

非正弦交流电路的视在功率为非正弦交流电压和电流有效值的乘积，即

$$S=VI \tag{1.1.7-46}$$

应注意，视在功率不等于各次谐波视在功率之和。

在工程中，往往采用等值的正弦波代替原来的非正弦波。原则是：等值正弦波的有效值等于非正弦波的有效值，等效正弦波的频率等于基波频率，并保持代替后的有功功率不变。

$$\cos\varphi=\frac{P}{VI} \tag{1.1.7-47}$$

$\cos\varphi$称为等值功率因数。

4 线性网络的基本分析方法和定理

网络分析的任务就是在给定的网络结构、参数和给定的输入下，确定所有支路的电流、电压和功率。

4.1 常用术语

4.1.1 网络

复杂电路总称为网络。网络中有电源的称为有源网络，无电源的称为无源网络。对外只有一对端子的网络称为两端网络或单口网络(图 1.1.7-20 a)。对外有两对端子的网络称为四端网络或双口网络(图 1.1.7-20 b)。

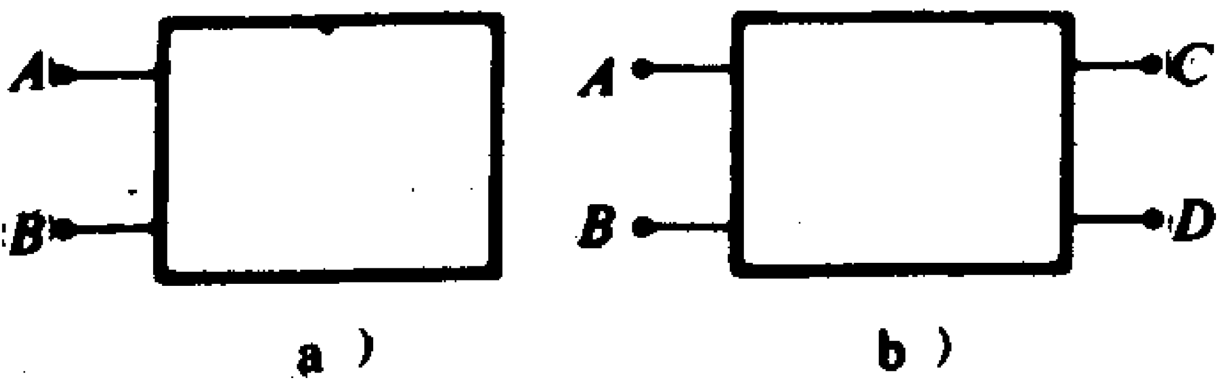


图 1.1.7-20 单口网络和双口网络

4.1.2 支路

凡一个或几个元件相串联的电路称为支路。图 1.1.7-21中的a-f-b、b-e-c等都为支路。在现代网络理论中，应用拓扑图的概念后，对支路有另一个定义，即不论如何联结，一个元件就作为一条支路。本手册采用前一种定义。

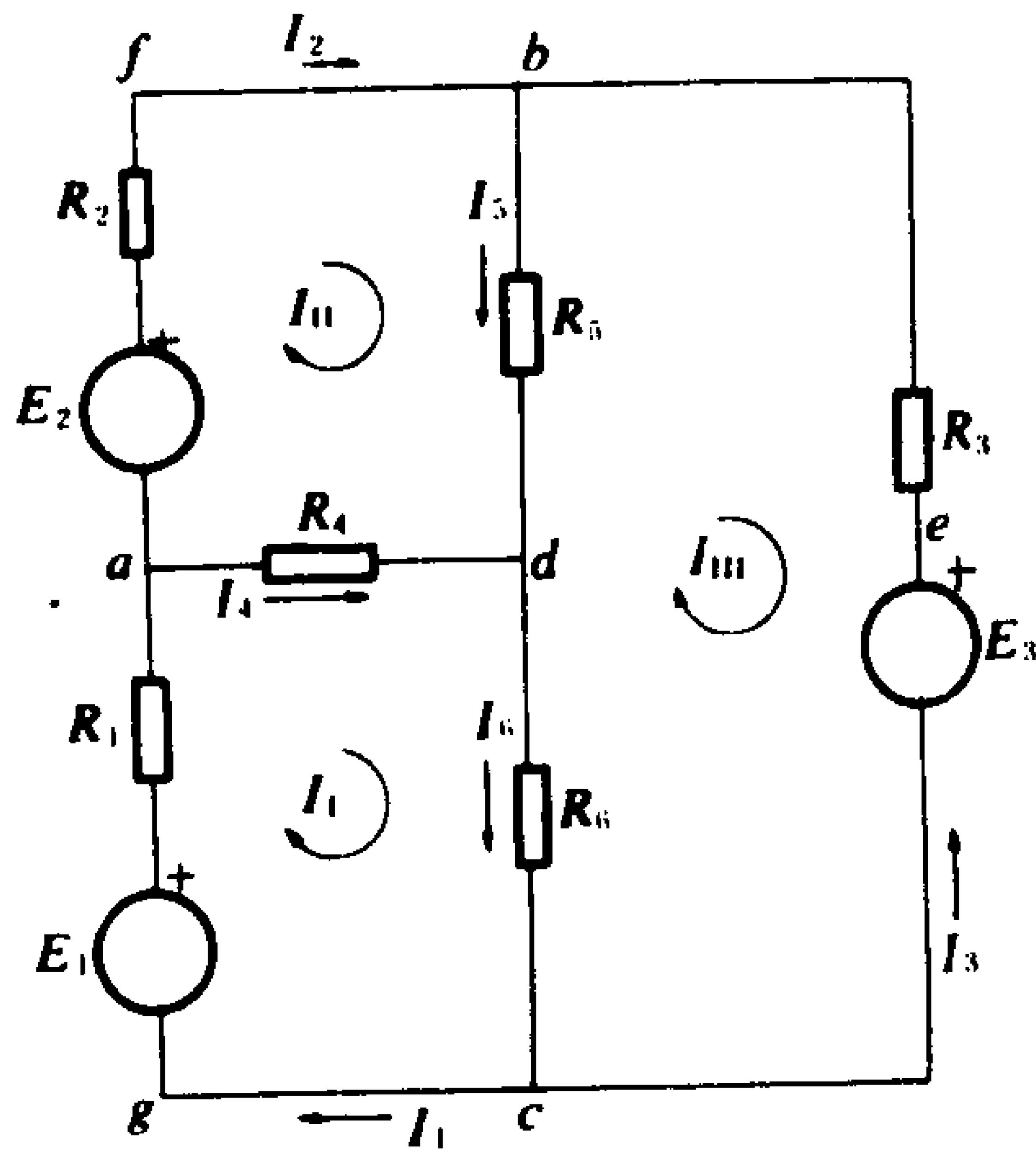


图 1.1.7-21 网络举例

4.1.3 节点

三条或三条以上的支路的联接点称为节点。图 1.1.7-21 中的a、b、c、d都是节点。在现代网络理论中，两条或两条以上的支路联结点就称为节点。本手册采用前一种定义。

4.1.4 网孔

网孔是一种最基本的回路，在其中再也分割不出其它的回路。图 1.1.7-21 中的回路a-f-b-d-a, a-d-c-g-a和b-e-c-d-b都是网孔。

4.1.5 激励与响应

一个网络的输入量称为激励，输出量称为响应。它们都可以是电流或电压。

4.1.6 开路

断开支路中的某一点，使该支路中的电流为零，称为开路或断路。

4.1.7 短路

使支路中某两点间的电阻（阻抗）为零，称为短路。

4.2 理想元件的串联和并联及其等效值

表 1.1.7-5 示出R、L、C元件的串联、并联及其等效值。

表 1.1.7-5　　R、L、C元件的串联和并联

联接方式			等效参数值
R	串联		$R_o = R_1 + R_2$
	并联		$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
L	串联		$L_o = L_1 + L_2$
	并联		$\frac{1}{L_o} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$
C	串联		$\frac{1}{C_o} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
	并联		$C_o = C_1 + C_2$

4.3 支路电流法

该方法是利用KCL和KVL分别对节点和回路列出方程组、解出各支路电流的一种网络计算方法。列方程的大致步骤如下：首先应选定各支路未知电流的正方向，然后利用KCL列出独立的电流方程组。对于有几个节点的网络，一般说来只能列出$n-1$个独立方程。最后利用KVL列出回路的电压方程。通常可取网孔来列电压方程。若网络共有b条支路和n个节点，则用KVL列出独立方程的数目应为$b-n+1$。

例：用支路电流法列出为求解图 1.1.7-21 所示的直流网络中各支路电流所必需的方程。

解：1）定出各支路电流的正方向如图中所示。

2）利用KCL列节点方程。本图中有 4 个节点，可列 3 个独立的节点方程。

节点：a　$I_1 - I_2 - I_4 = 0$　①

b　$I_2 + I_3 - I_5 = 0$　②

c　$I_6 - I_1 - I_3 = 0$　③

3）用网孔电压方程补足为求解所必需的方程数。

网孔：$afbda$　$R_2I_2 + R_5I_5 - R_4I_4 = E_2$　④

$adcga$　$R_1I_1 + R_4I_4 + R_6I_6 = E_1$　⑤

$bdceb$　$R_3I_3 + R_5I_5 + R_6I_6 = E_3$　⑥

方程①～⑥就是为求解各支路电流所必需的方程组。

4.4 网孔电流法

网孔电流是一种设想的、只沿网孔边界流动的电流，如图 1.1.7-21 中所示的I_{I}、I_{II}和I_{III}。若已知网孔电流，则支路电流就可由支路中流过的网孔电流的代数和求得。作网络计算时，先拟定网孔电流，然后利用KVL列出足够数目的电压方程以求解网孔电流的计算方法，称为网孔电流法。

例：求解图 1.1.7-21 中的各网孔电流。

解：1)确定网孔数目（本例中为 3），拟定网孔电流及其绕行方向（一般取各网孔电流有相同的绕行方向）。本例中，各网孔电流均为顺时针绕行。

2)利用KVL列出网孔电流方程

$$\begin{aligned}
&(R_1+R_4+R_6)I_{\text{I}} &&-R_4I_{\text{II}} &&-R_6I_{\text{III}}=E_1\\
&-R_4I_{\text{I}} &&+(R_2+R_4+R_5)I_{\text{II}} &&-R_5I_{\text{III}}=E_2\\
&-R_6I_{\text{I}} &&-R_5I_{\text{II}}+(R_3+R_5+R_6) &&I_{\text{III}}=-E_3
\end{aligned}$$

3)解上列方程组即得I_{I}, I_{II}和I_{III}

4)由网孔电流求出各支路电流

$$I_1=I_{\text{I}};\quad I_2=I_{\text{II}};\quad I_3=I_{\text{III}}$$

$$I_4=I_{\text{II}}-I_{\text{I}};\quad I_5=I_{\text{II}}-I_{\text{III}};\quad I_6=I_{\text{I}}-I_{\text{III}}$$

为一般化起见，可将步骤 2)中的方程组写成如下的普遍形式。针对本例，可写成

$$\left.\begin{aligned}
R_{11}I_{\text{I}}+R_{12}I_{\text{II}}+R_{13}I_{\text{III}}=E_{\text{I}}\\
R_{21}I_{\text{I}}+R_{22}I_{\text{II}}+R_{23}I_{\text{III}}=E_{\text{II}}\\
R_{31}I_{\text{I}}+R_{32}I_{\text{II}}+R_{33}I_{\text{III}}=E_{\text{III}}
\end{aligned}\right\}\tag{1.1.7-48}$$

式中，$R_{11}=R_1+R_4+R_6$；$R_{22}=R_2+R_4+R_5$；$R_{33}=R_3+R_5+R_6$分别称为网孔Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的自阻。自阻是一个网孔全部电阻之和。自阻都是正值。$R_{12}=R_{21}=-R_4$是网孔Ⅰ和Ⅱ公共支路的电阻，称为互阻。同理，有$R_{13}=R_{31}=-R_6$；$R_{23}=R_{32}=-R_5$也是互阻。当所有网孔电流有着相同的绕行方向时，互阻取负值。E_{I}、E_{II}、E_{III}则分别为网孔Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ中电势的代数和。

利用网孔电流法时，若网络中有电流源，应将它化为等效的电压源。

4.5 节点电位法

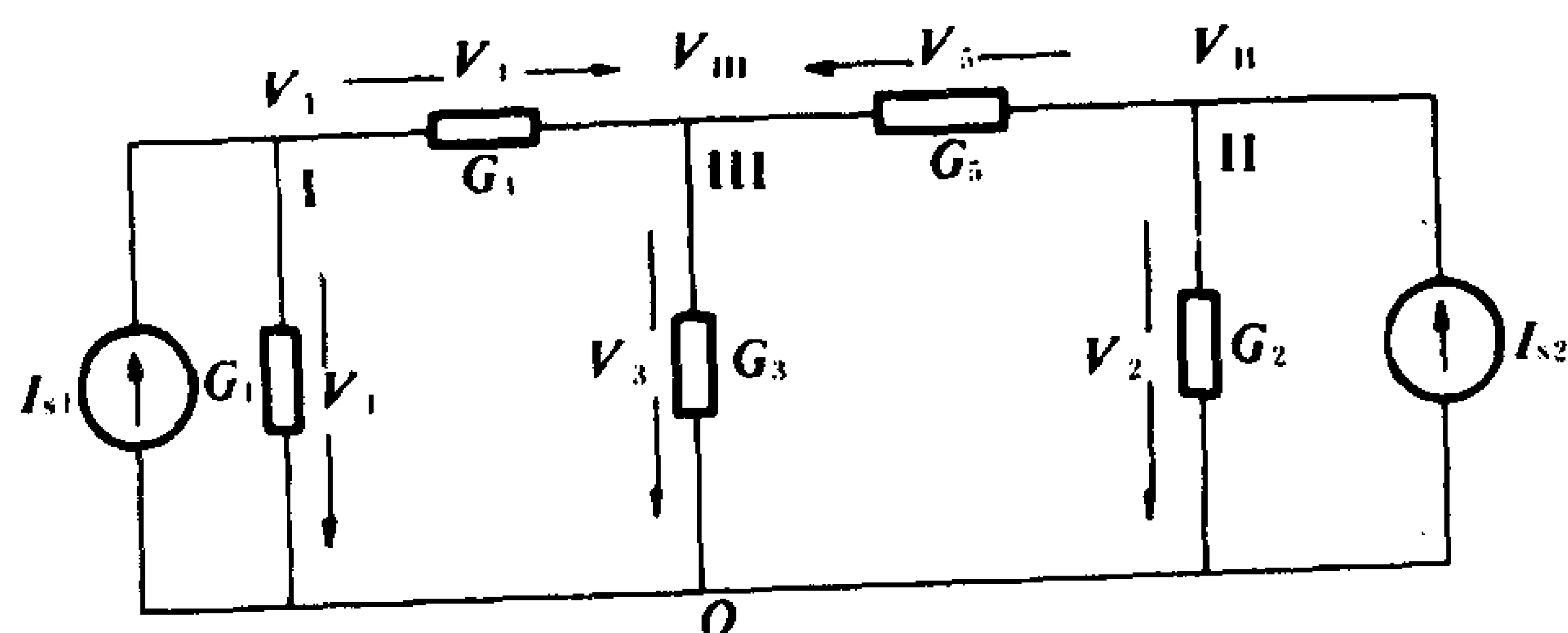


图 1.1.7-22 节点电位法图例

在网络中，选取一个合适的节点作为参考点(零电位点)，利用KCL将其余各节点的电位作为求解的对象，这种方法称为节点电位法。

例：用节点电位法求图 1.1.7-22 中各支路电流。

解：1)任选O点为参考点，并令节点Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的电位为V_{I}、V_{II}、V_{III}。

2)根据KCL，列出除了参考点O以外的节点电流方程

节点Ⅰ $\quad (G_1+G_4)V_{\text{I}} \quad -G_4V_{\text{III}}=I_{S1}$

II　　$(G_2+G_5)V_{II}\quad -G_5V_{III}=I_{S2}$

III　　$-G_4V_I\quad -G_5V_{II}+(G_3+G_4+G_5)V_{III}=O$

3)求解上列联立方程，就得到各节点电位V_I、V_{II}和V_{III}

4)根据节点电位，可求得各支路电压

$V_1=V_I$;　$V_2=V_{II}$;　$V_3=V_{III}$

$V_4=V_I-V_{III}$;　　$V_5=V_{II}-V_{III}$

5)根据支路电压，即可算得各支路电流。

为一般化起见，可将联立方程写成普遍的形式，以便适用于更多的节点。对于本例，可写成

$$\left.\begin{aligned}G_{11}V_I+G_{12}V_{II}+G_{13}V_{III}=I_{SI}\\G_{21}V_I+G_{22}V_{II}+G_{23}V_{III}=I_{SII}\\G_{31}V_I+G_{32}V_{II}+G_{33}V_{III}=I_{SIII}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.7\text{-}49)$$

其中，$G_{11}=G_1+G_4$；$G_{22}=G_2+G_5$；$G_{33}=G_3+G_4+G_5$分别称为节点Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的自导，就是接到该节点上所有支路的电导之和。$G_{13}=G_{31}=-G_4$是节点Ⅰ和Ⅲ之间所有公共支路电导之和。称为互导。同理，有$G_{23}=G_{32}=-G_5$，$G_{12}=G_{21}=0$。自导总是取正值、互导则取负值。这是由于除参考点以外的所有节点的电位均假定为正的缘故。I_{SI}、I_{SII}、I_{SIII}分别为流到节点Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的源电流的代数和，流入节点者为正，流出节点者为负。

应用节点电位法求解网络时，应将网络中的电压源化为等效的电流源。

4.6　Y—△变换

在某些网络中，会遇到如图1.1.7-23的电路联接方式。图中，a)图称为Y形联接，b)图称为△形联接。为了简化网络的计算，可以将这两种联接作等效的变换。所谓等效变换，是指变换后从三个端子中的任两个端子看入的阻值不变。

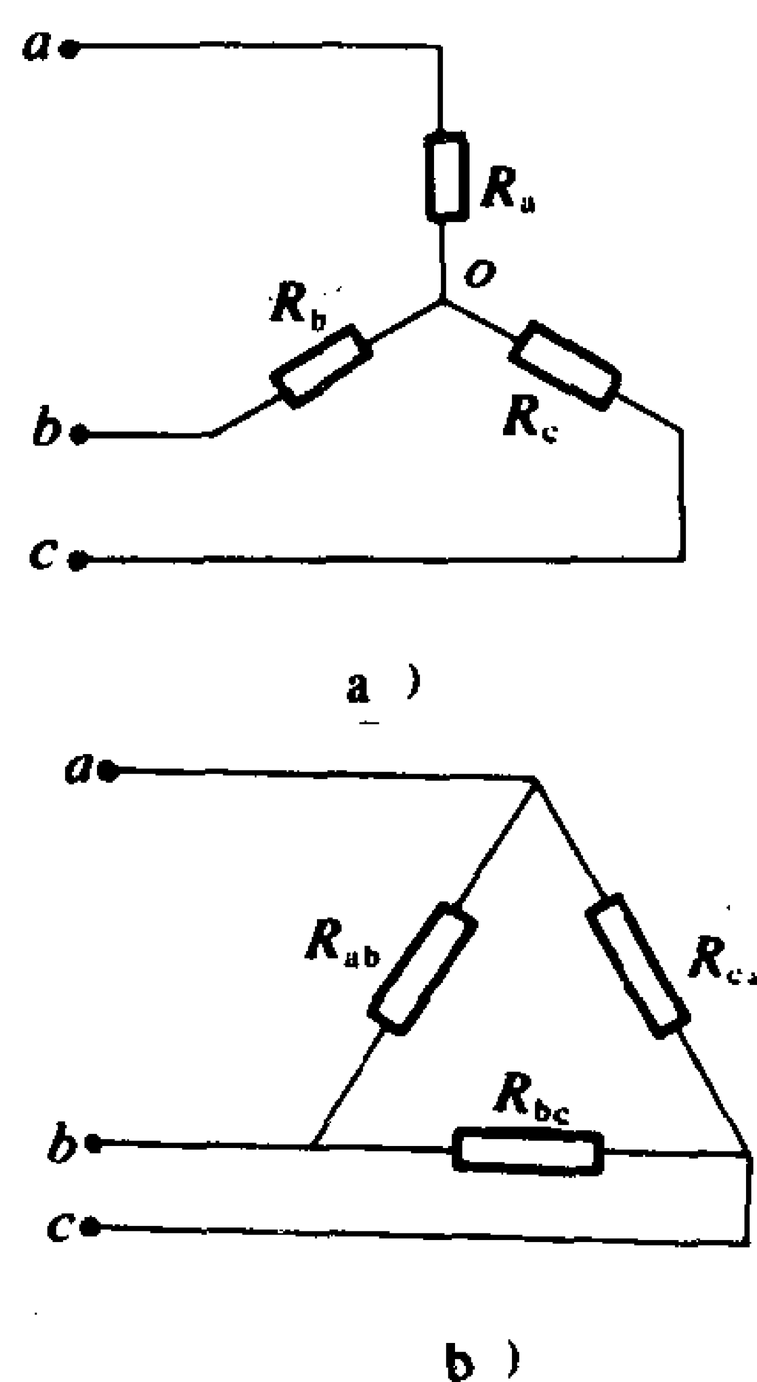


图1.1.7-23　Y-△变换

由Y变换到△时，每一对端子间的等效电阻为

$$\left.\begin{aligned}R_{ab}=R_a+R_b+\frac{R_a\cdot R_b}{R_c}\\R_{bc}=R_b+R_c+\frac{R_b\cdot R_c}{R_a}\\R_{ca}=R_c+R_a+\frac{R_c\cdot R_a}{R_b}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.7\text{-}50)$$

由△变换到Y时，每一端子对公共接点O间的等效阻值为

$$\left.\begin{aligned}R_a=\frac{R_{ab}\cdot R_{ca}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}\\R_b=\frac{R_{bc}\cdot R_{ab}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}\\R_c=\frac{R_{ca}\cdot R_{bc}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.7\text{-}51)$$

上述所举的计算方法，虽然都是直流的例子，但方法本身同样也适用于正弦交流电路，只要将方程中的电阻、电导分别用复阻抗、复导纳代替，并且将电流、电压、电动势用相量表示即可。

4.7 叠加原理

叠加原理是线性系统中的基本特性之一。在任何线性网络中，每一支路的电流或电压，都可以看成是每个独立电源单独作用时，在该支路中产生的电流或电压的代数和。

当考虑某一电源单独作用时，应将其余的电源（电动势、源电流）作为零看待。

该定理只适用于计算电流和电压，不能用于计算功率。

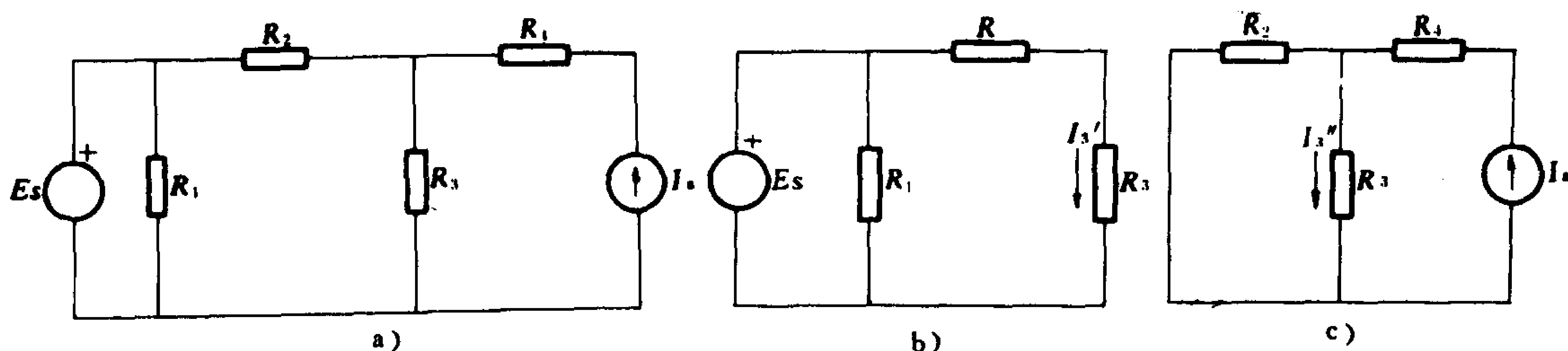


图 1.1.7-24　叠加原理图例

例：电路如图 1.1.7-24 所示，试用叠加原理求R_3中的电流。

解：1)E_S单独作用时，应将I_S作为零(在源电流处断开)，于是电路变成如图b所示。求得I_3'为：

$$I_3'=\frac{E_3}{R_2+R_3}$$

2)I_S单独作用时，应将E_S作为零（将E_S短路处理），于是电路变为图C所示，求得I_3''为：

$$I_3''=\frac{R_2}{R_2+R_3}I_S$$

3)根据叠加原理，当E_S和I_S共同作用时，电流I_3应为

$$I_3=I_3'+I_3''$$

4.8 戴维南定理

对任一含源线性两端网络，都可以用一与之等效的电压源代替。这个电压源的电动势应等于原网络的开路电压，其内阻应等于将原网络中的电源（电压源和电流源）为零后，从端口看入的电阻。

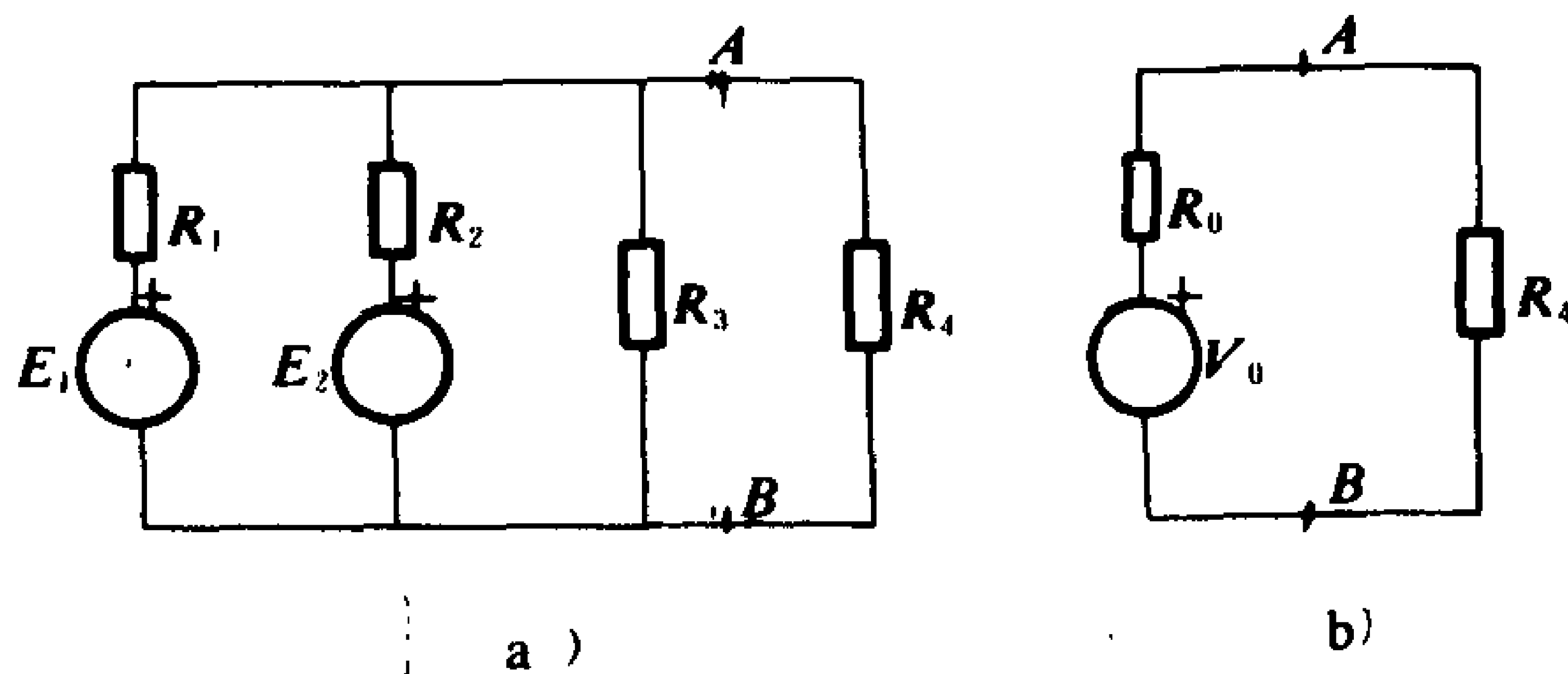


图 1.1.7-25　戴维南定理图例

例：试用戴维南定理计算图 1.1.7-25 中流过电阻R_4中的电流。

解：1)将R_4开路，求得AB以左网络的开路电压V_0为

$$V_0=\frac{E_1/R_1+E_2/R_2}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}}$$

2)将E_1、E_2短路，求得AB以左网络的输入电阻R_0为

$$R_0=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}}$$

3)用戴维南等效电源代替AB以左的原网络后，得如图b)所示的电路，求得R_4中的电流I_4为

$$I_4=\frac{V_0}{R_0+R_4}$$

上述的叠加原理和戴维南定理同样适用于交流电路。

5 正弦交流电路

5.1 正弦交流电的相量

在正弦交流电路的计算中，正弦交流电（电流、电压、电动势）可用一个与其相对应的矢量表示。这个矢量的长度等于该交流电的有效值，它与横坐标的夹角等于初相角。如将这个矢量画在复平面上(图 1.1.7-26)，则这个矢量必有一个与之相应的复数，称之谓相量。通常，画在复平面上的矢量也称为相量。

图 1.1.7-26 所示的电流相量可写成如下的几种复数形式。

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}&=I(\cos\theta+j\sin\theta)\\\dot{I}&=Ie^{j\theta}\\\dot{I}&=I^{\angle\theta}\end{aligned}\right\}\qquad(1.1.7\text{-}52)$$

式中，$\dot{I}$为电流相量，I为它的有效值，θ为初相角。

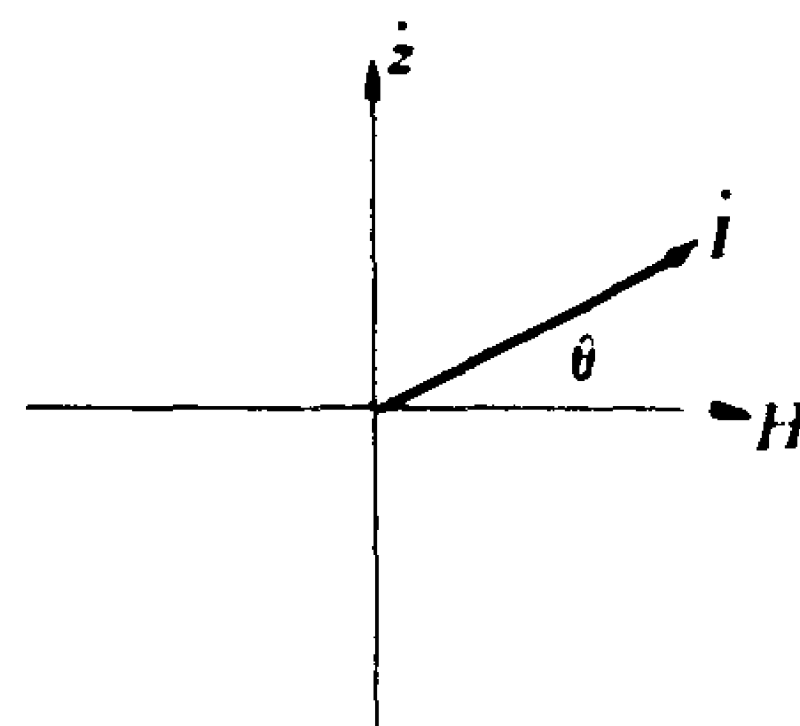


图 1.1.7-26 复平面上的矢量

5.2 相量图

将几个描述同频率正弦量的相量画在同一复平面上，这种图形称为相量图。它能比较直观地表示出各个相量之间的关系。

5.3 单一参数元件的基本特性

在稳态正弦交流电路中，单一参数(R、L、C)元件的基本特性，主要指的是电压与电流的有效值关系和相位关系。若采用相量形式，这两个关系可以统一在一个表示式中。表 1.1.7-6 示出R、L、C元件的基本特性。表中$X_L=\omega L$称为电感元件的感抗，它的复数形式为$j\omega L$。$X_C=\frac{1}{\omega C}$称为电容元件的容抗，它的复数形式为$X_c=-j\frac{1}{\omega C}$。感抗和容抗总称为电抗，电抗的单位为欧姆(Ω)。

表 1.1.7-6　　　　　　　　　　R、L、C在交流电路中的特性

元件	电　阻　R	电　感　L	电　容　C
符号			
瞬时值	$v=iR$	$v=L\frac{di}{dt}$	$i=c\frac{dv}{dt}$
有效值	$V=IR$	$V=IX_L$	$V=IX_C$
相　量	$\dot{V}=\dot{I}R$	$\dot{V}=j\dot{I}X_L$	$\dot{V}=-j\dot{I}X_C$
相量图	$\dot{I}$　$\dot{V}$	90°　$\dot{V}$　$\dot{I}$	90°　$\dot{I}$　$\dot{V}$

5.4 阻抗与复阻抗

一无源支路两端的电压$\dot{V}$与其中的电流$\dot{I}$的比值称为该支路的复阻抗。单位为欧（Ω）。

$$Z=\frac{\dot{V}}{\dot{I}}=ze^{j\theta} \tag{1.1.7-53}$$

式中，z是该复阻抗的模，是该支路的阻抗值。θ是Z的幅角，也就是电压$\dot{V}$与电流$\dot{I}$之间的相位。

R、L、C串联电路（图 1.1.7-27）的复阻抗可写成

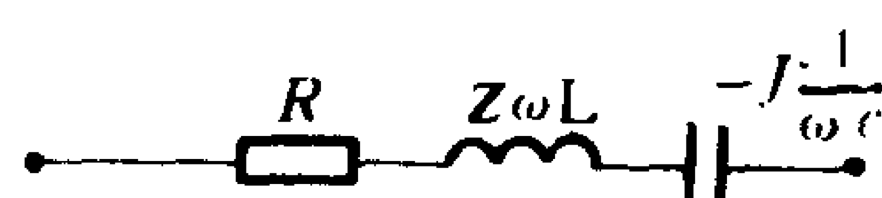


图 1.1.7-27　R、L、C串联电路

$$\begin{aligned}Z&=R+j(\omega L-\frac{1}{\omega C})\\&=\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}\,e^{j\theta}\\&=ze^{j\theta}\end{aligned} \tag{1.1.7-54}$$

由式（1.1.7-54）可知，该支路的阻抗z为

$$z=\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2} \tag{1.1.7-55}$$

相位角θ为

$$\theta=\mathrm{tg}^{-1}\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{R} \tag{1.1.7-56}$$

复阻抗Z的实部为该支路的电阻，虚部为该支路的电抗。当$\omega L>\frac{1}{\omega C}$时，支路呈电感性。当$\omega L<\frac{1}{\omega C}$时，呈电容性。当$\omega L=\frac{1}{\omega C}$时，则该电路处于串联谐振状态。

5.5 导纳与复导纳

复阻抗的倒数称为复导纳，单位为西(S)。

$$\begin{aligned}Y&=\frac{1}{Z}=G-jB\\&=\sqrt{G^2+B^2}\,e^{j\beta}\\&=ye^{j\beta}\end{aligned} \tag{1.1.7-57}$$

式中，G、B和y分别称为电路的电导、电纳和导纳。它们的单位都是欧（Ω）。

一个电路的阻抗和导纳是可以等效互换的。当电路用阻抗表示时，它是一个串联电路模型，当用导纳表示时，则是一个并联电路模型（图 1.1.7-28）。它们的等效关系是

$$\left.\begin{aligned} G&=\frac{R}{R^2+X^2} \\ B&=\frac{X}{R^2+X^2} \end{aligned}\right\} \qquad (1.1.7\text{-}58)$$

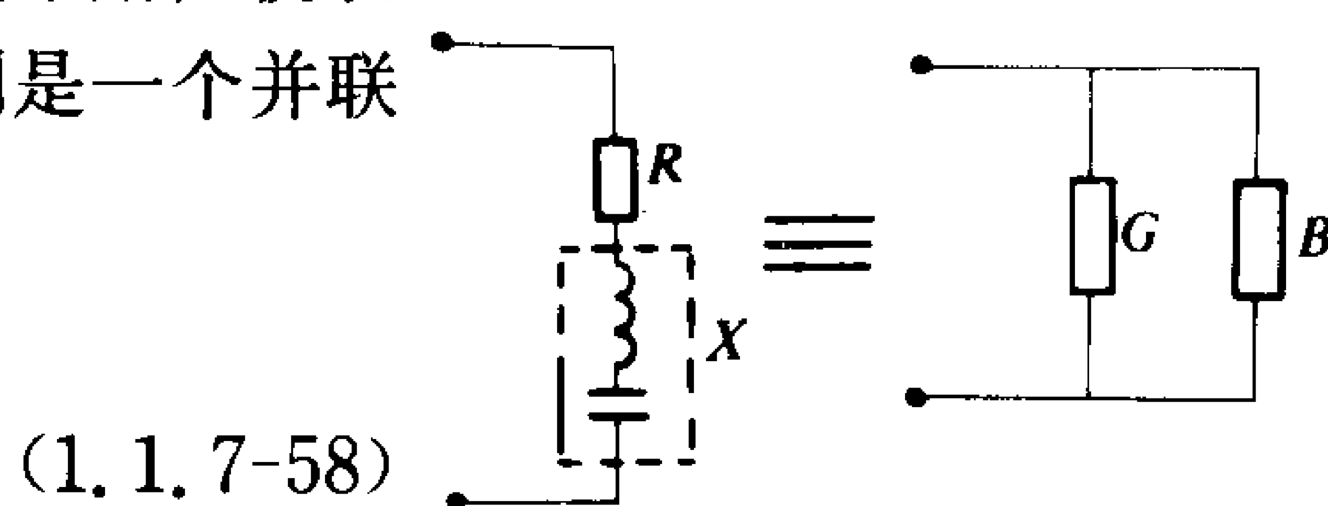


图 1.1.7-28 阻抗和导纳

5.6 交流电功率

交流电功率有有功功率、无功功率和视在功率三种。它们的计算公式分别为

$$\left.\begin{aligned} &\text{有功功率} \quad P=VI\cos\theta \\ &\text{无功功率} \quad Q=VI\sin\theta \\ &\text{视在功率} \quad S=V\cdot I \end{aligned}\right\} \qquad (1.1.7\text{-}59)$$

式中，θ是$\dot{V}$和$\dot{I}$之间的相位角，$\cos\theta$称为功率因数。这三种功率的物理意义是不相同的，通常说的功率输出、输入等指的是有功功率。有功功率的单位用瓦（W）、千瓦（kW）等。

有功、无功和视在功率之间的关系是

$$S^2=P^2+Q^2 \qquad (1.1.7\text{-}60)$$

5.7 交流电路的计算

用于计算直流线性网络的方法和定理，都可以应用于线性交流电路的计算，只要将其中的电流、电压、电动势改用相量表示，电阻用阻抗代替即可。

例：交流电桥的原理性电路如图1.1.7-29所示，其中Z_x是待测元件的复阻抗，Z_2、Z_3、Z_4是标准元件的复阻抗，且有两个参数是可调的。Z_g是指零仪表的复阻抗。求流经指零仪表的电流I_g，并求电桥平衡的条件。

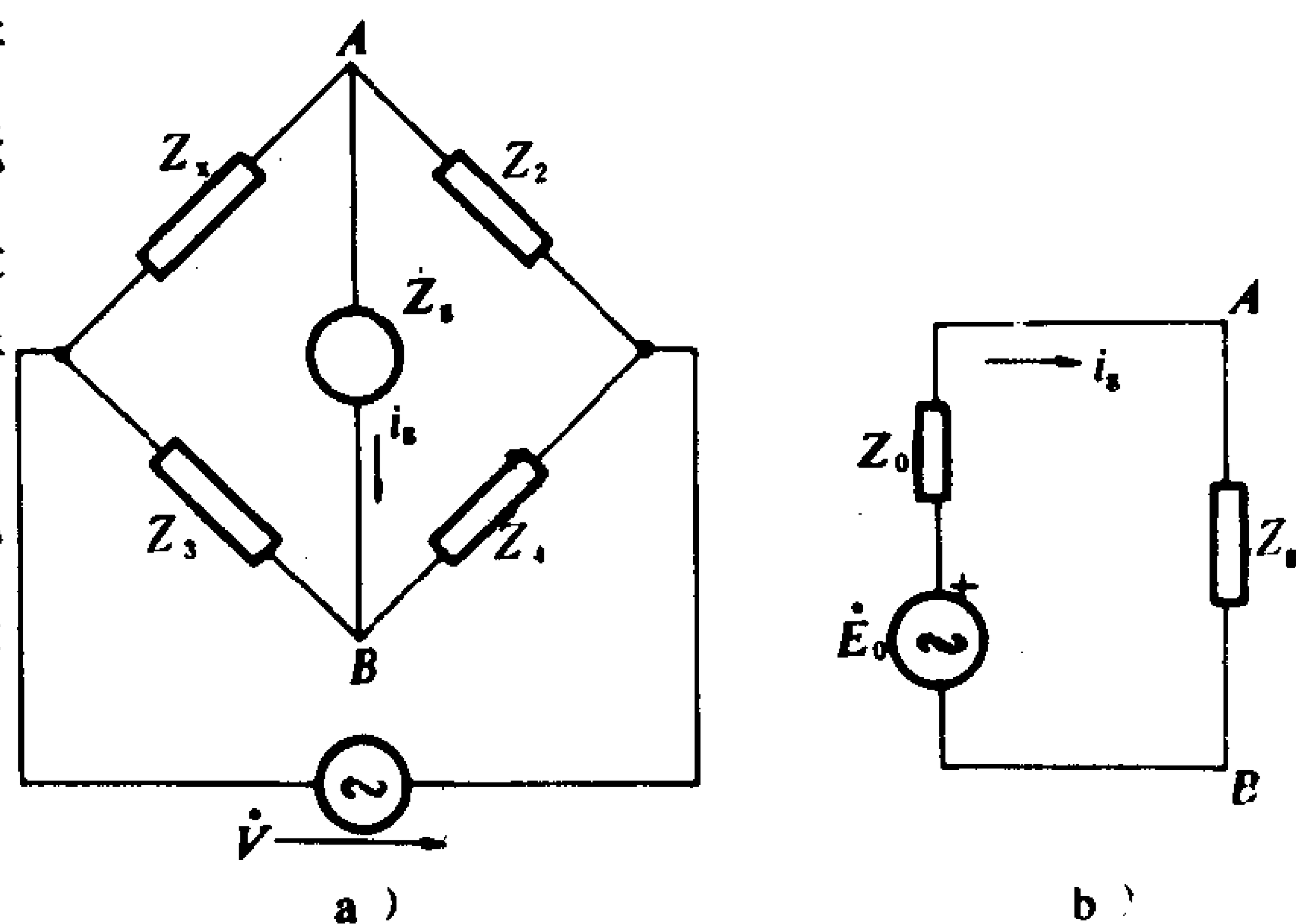


图 1.1.7-29 交流电桥原理图

解：1）求I_g，应用戴维南定理求解，首先将指零仪表开路，求两端网络的等效电动势$\dot{E}_0$，它等于AB两点间的开路电压$\dot{V}_{ABO}$

$$\dot{E}_0=\dot{V}_{ABO}=\frac{\dot{V}}{Z_3+Z_4}\cdot Z_3-\frac{\dot{V}}{Z_X+Z_2}\cdot Z_X$$

$$=\frac{Z_2Z_3-Z_XZ_4}{(Z_3+Z_4)(Z_X+Z_2)}\cdot\dot{V}$$

然后再求等效电源的内阻抗Z_0

$$Z_0=\frac{Z_2\cdot Z_X}{Z_2+Z_X}+\frac{Z_3\cdot Z_4}{Z_3+Z_4}$$

最后得图b）的等效电路，并由此求得I_g为

$$I_g=\frac{\dot{E}_0}{Z_0+Z_g}=\frac{\dot{V}(Z_2\cdot Z_3-Z_XZ_4)}{Z_g(Z_X+Z_3)(Z_2+Z_4)+Z_2Z_4(Z_X+Z_4)+Z_XZ_4(Z_2+Z_3)}$$

2)当电桥平衡时，$I_g=0$，故有

$$Z_2\cdot Z_3=Z_X\cdot Z_4$$

将阻抗写成指数的形式，则有

$$z_2e^{j\varphi_2}\cdot z_3e^{j\varphi_3}=z_Xe^{j\varphi_X}\cdot Z_4^{e^{j\varphi_4}}$$

故得电桥平衡的条件是

$$z_2\cdot z_3=z_X\cdot z_4$$
$$\varphi_2+\varphi_3=\varphi_X+\varphi_4$$

5.8 具有互感的交流电路

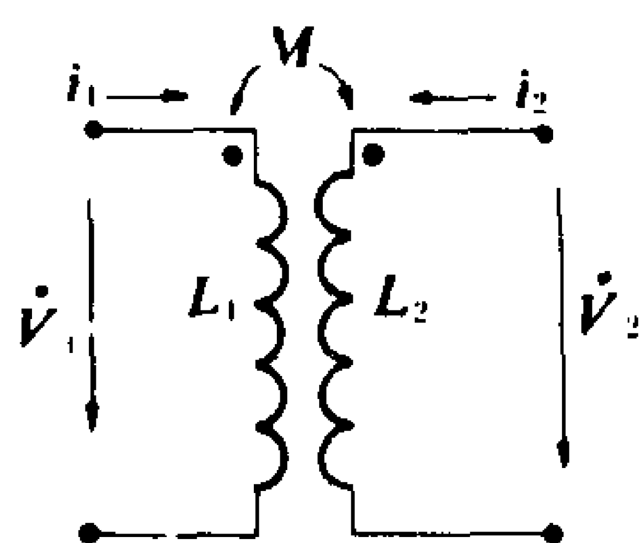


图 1.1.7-30 具有互感的交流电路

在交流电路计算中，当两个线圈存在着互感时，必须考虑到它们的互感电压。对于图 1.1.7-30 的交流电路。可写出电压方程如(1.1.7-61)。

$$\begin{aligned}\dot{V}_1&=j\omega L_1\dot{I}_1\pm j\omega M\dot{I}_2\\ \dot{V}_2&=j\omega L_2\dot{I}_2\pm j\omega M\dot{I}_1\end{aligned}\qquad(1.1.7\text{-}61)$$

式中，当两个正方向电流从同名端流入时，互感电压$j\omega MI$取正号。若两个正方向电流从异名端流入，则取负号。

5.8.1 互感线圈串联的等效电感

互感线圈的串联可以有两种形式：顺接和反接。当两个线圈的异名端相联接时(图 1.1.7-31)，称为顺接。它的电压方程可写成

$$\begin{aligned}\dot{V}&=j\omega L_1\dot{I}+j\omega M\dot{I}+j\omega L_2\dot{I}+j\omega M\dot{I}\\ &=j(L_1+L_2+2M)\ \omega\dot{I}\\ &=j\omega L_A\dot{I}\end{aligned}\qquad(1.1.7\text{-}62)$$

其中 $L_A=L_1+L_2+2M$

为顺接时的等效电感。

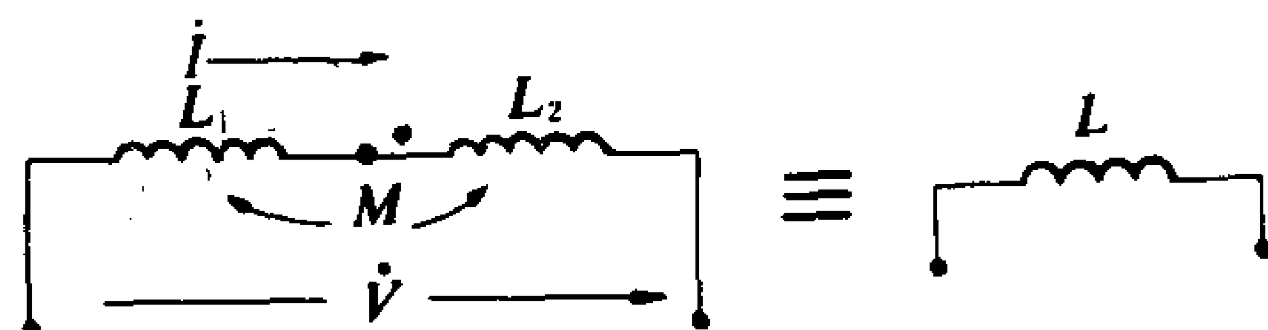


图 1.1.7-31 互感线圈的串联

同理，可得反接串联时的等效电感L_R是

$$L_R=L_1+L_2-2M\qquad(1.1.7\text{-}63)$$

5.8.2 互感线圈并联的等效电感

两个互感线圈并联时，也有两种接法。一种是同名端联在同一侧(图 1.1.7-32 a)，另一种是异名端联在同一侧(图 1.1.7-32 b)。这两种接法的电压方程是

$$\begin{aligned}\dot{V}&=j\omega L_1\dot{I}_1\pm j\omega M\dot{I}_2\\ \dot{V}&=j\omega L_2\dot{I}_2\pm j\omega M\dot{I}_1\end{aligned}\qquad(1.1.7\text{-}64)$$

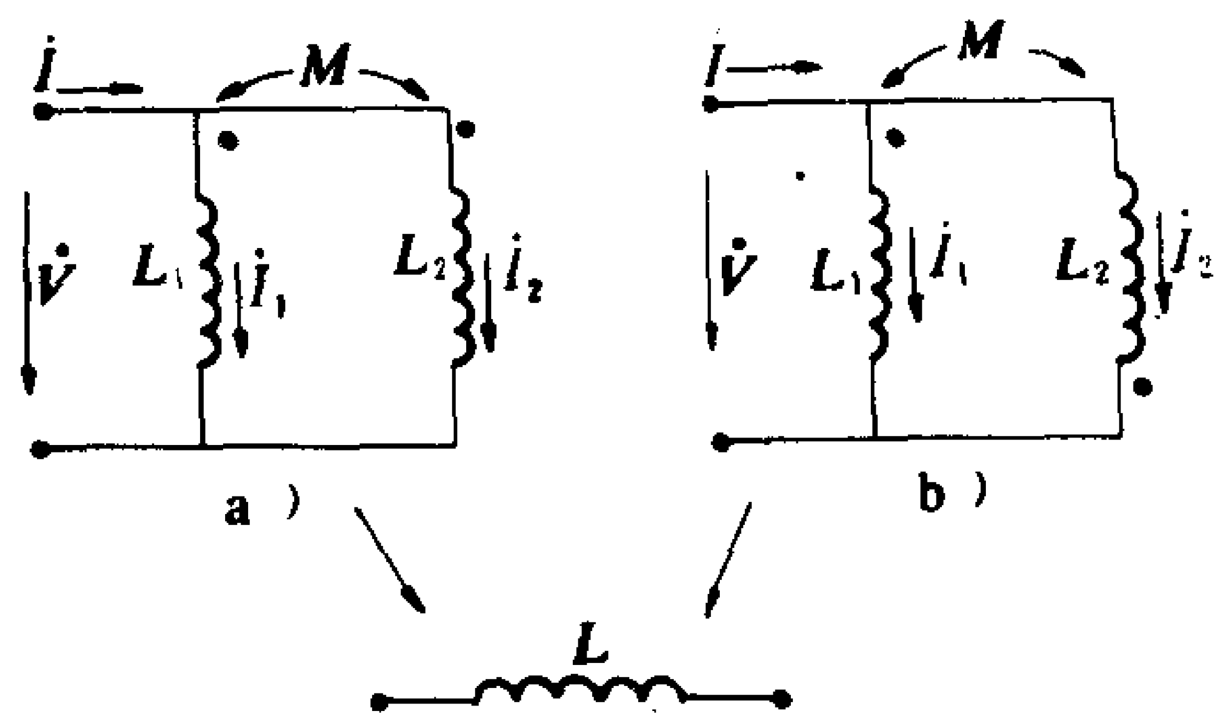


图 1.1.7-32 互感线圈的并联

式中，当同名端连在同一侧时，互感电压$j\omega M\dot{I}_2$取正号，反之，则取负号。

两个互感线圈并联后的等效电感为

$$L=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2\mp M}\qquad(1.1.7\text{-}65)$$

式中，当异名端联在一侧时，取正号，反之则取负号。

5.9 交流电路中的谐振

在含有电感L和电容C的支流电路中，当满足一定的条件时，电路的电压和电流同相，电路呈纯阻性。这样的一种特殊现象称为谐振。串联谐振电路和并联谐振电路是两种基本的谐振电路。表 1.1.7-7 示出这两种基本谐振电路的特征。

表 1.1.7-7　　谐振电路的特性

	串联谐振电路	并联谐振电路
电路形式	$\dot{V}$；r $\dot{V}_R$；L $\dot{V}_L$；C $\dot{V}_C$	$\dot{I}_S$；$\dot{I}_C$ C；$\dot{I}_{rL}$ L r
特性阻抗	$\rho=\sqrt{L/C}$	
品质因数	$Q=\frac{\omega_0 L}{r}=\frac{1}{\omega_0 Cr}=\rho/r$	
谐振频率	$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$f_0\approx\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ （Q较高时）
谐振时的阻抗	电抗为零，阻抗为极小值 $Z_0=r$	电纳为零，阻抗为极大值 $Z_0=L/Cr=Q\rho=Q^2r$
$f<f_0$时阻抗的性质	电容性	电感性
$f>f_0$时阻抗的性质	电感性	电容性
谐振时元件上的电压或通过的电流	$\dot{V}_L=jQ\dot{V}$ $\dot{V}_C=-jQ\dot{V}$ $\dot{V}_R=\dot{V}$	$\dot{I}_{rL}=(1-jQ)\dot{I}_S$ $\dot{I}_C=jQ\dot{I}_S$
通频带	$B=\frac{f_0}{Q}$	

6　三相电路

6.1　三相交流电

三相电动势、电压和电流统称为三相交流电。提供三相交流电源的设备称为三相电源，如三相交流发电机。将三相电能转换成其它能量的设备称为三相负载，如三相交流异步电动机。

6.1.1　相

三相交流发电机和电动机，它们的定子有着三副绕组，每一副绕组就称为一相。例如A相、B相和C相。从电路的观点看，三相电路可以看成由三个单相电路组成的。

6.1.2　相电压（电动势）

每一相的电压（电动势）称为相电压（电动势）。

6.1.3 相电流

每一相中的电流称为相电流。

6.1.4 线电流

流经三相电源或负载端线（火线）中的电流称为线电流。

6.1.5 线电压

每一对端线（火线）之间的电压称为线电压。

6.1.6 中线

在星形联接的三相制中，由中点引出的端线称为中线。

6.1.7 相序

三相交流电依次到达正最大值的次序称为相序。

6.1.8 三相对称交流电

三相交流电，如果它们的频率相同、振幅相等，但在相位上彼此相差 120°。则称之谓三相对称交流电。

6.1.9 三相对称负载

若三个相的复阻抗相等，则为三相对称负载，也称三相平衡负载。

6.2 三相交流电的表示法

三相交流电可以用三角函数式、波形图、相量和相量图来表示。

设三相发电机的三相绕组如图 1.1.7-33 a）所示，其中A、B、C和X、Y、Z分别是三个相绕组的始端和末端。若三相电势e_A、e_B和e_C是对称的，则这三个电势可用三角函数式表示为式（1.1.7-66），其波形图如图 1.1.7-33 b)所示。

$$\left.\begin{aligned} e_A &= E_m\sin\omega t \\ e_B &= E_m\sin(\omega t-120^\circ) \\ e_C &= E_m\sin(\omega t+120^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad (1.1.7\text{-}66)$$

若表示为相量的形式，则有

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_A &= \frac{1}{\sqrt{2}}E_m\angle 0^\circ \\ \dot{E}_B &= \frac{1}{\sqrt{2}}\dot{E}_m\angle -120^\circ \\ \dot{E}_C &= \frac{1}{\sqrt{2}}\dot{E}_m\angle -120^\circ \end{aligned}\right\} \qquad (1.1.7\text{-}67)$$

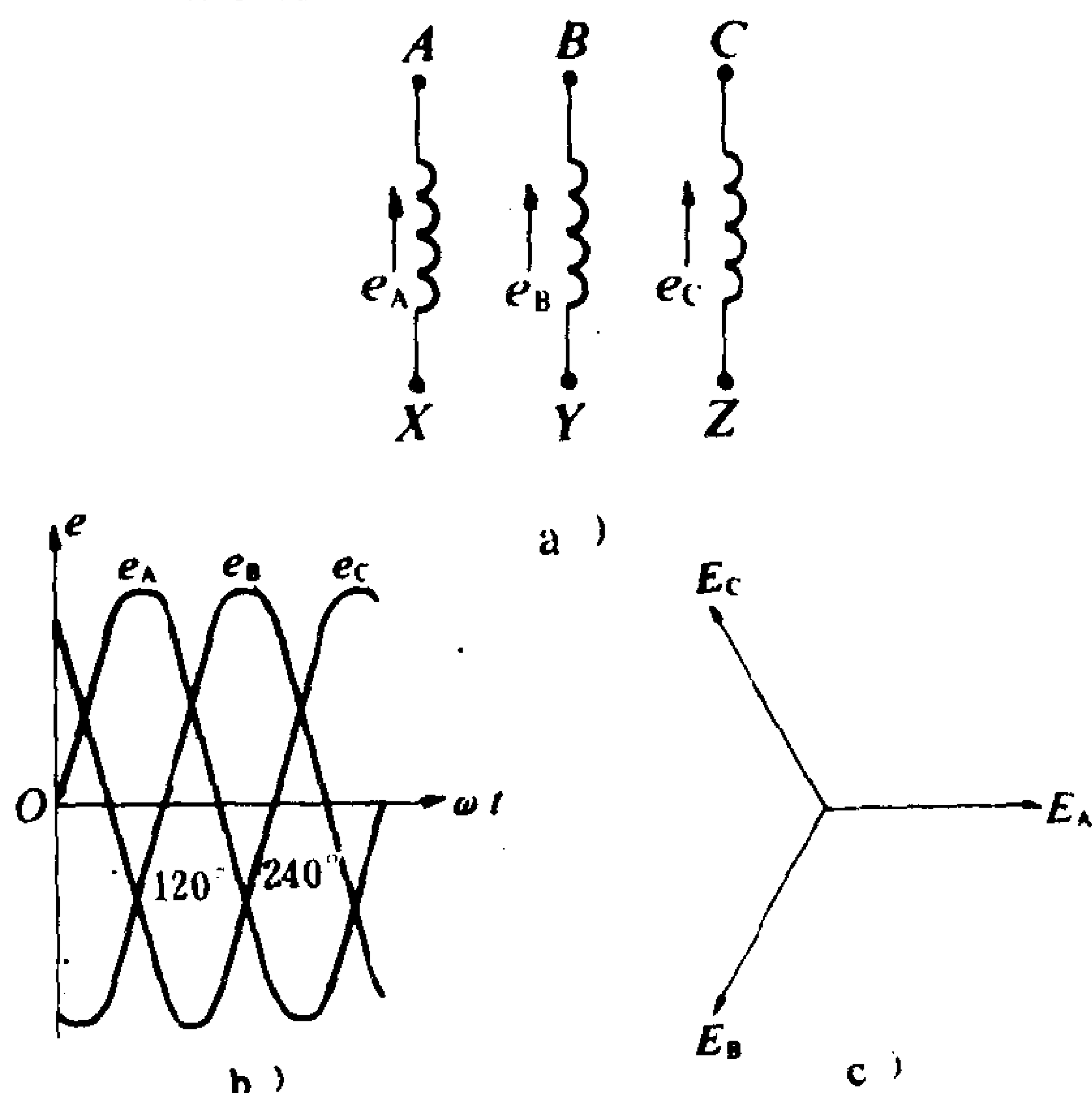


图 1.1.7-33 三相发电机示意图

式中，E_A、E_B、E_C分别为三相电势的有效值。其相量图见图 1.1.7-33c）。

三相对称电压、电流的表示方法雷同。

6.3 三相电路的联接

星形联接和三角形联接是三相电路的最基本的两种联接法。表 1.1.7-8 示出这两种接法中的一些基本关系。

表 1.1.7-8　　　　　星形和三角形联接法的三相电路的基本关系

		星形联接		三角形联接
		三相三线制	三相四线制	
联接方式				
相电压与线电压	一般关系	$\dot{V}_{AB}=\dot{V}_{AO}-\dot{V}_{BO}$ $\dot{V}_{BC}=\dot{V}_{BO}-\dot{V}_{CO}$ $\dot{V}_{CA}=\dot{V}_{CO}-\dot{V}_{AO}$	①一般关系同三线制 ②若电源电压对称，即使负载不对称，亦能得到对称相压	线压 V_l= 相压 V_p
	负载对称时	$V_P=\frac{1}{\sqrt{3}}V_l$　V_l-线压 V_p-相压	$V_p=\frac{1}{\sqrt{3}}V_l$	$V_p=V_l$
相电流与线电流	一般关系	$I_p=I_l$	$I_p=I_l$	$\dot{I}_A=\dot{I}_{AP}-\dot{I}_{CP}$ $\dot{I}_B=\dot{I}_{BP}-\dot{I}_{AP}$ $\dot{I}_C=\dot{I}_{CP}-\dot{I}_{BP}$
	负载对称时	$I_p=I_l$(对称)	$I_p=I_l$(对称)	$I_p=\frac{1}{\sqrt{3}}I_l$
	中线电流		$\dot{I}_O=\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C$ 对称时 $\dot{I}_0=0$	
电功率		$P=P_A+P_B+P_C=V_{AP}I_{AP}\cos\theta_A+V_{BP}\cdot I_{BP}\cos\theta_B+V_{CP}\cdot I_{CP}\cdot\cos\theta_C$ 对称时　$P=\sqrt{3}V_lI_l\cos\theta$		

6.4 三相电功率

在三相电路中，电功率也可分为有功功率、无功功率和视在功率三种。

三相有功功率应等于各相有功功率之和。

$$P=P_A+P_B+P_C$$
$$=V_{AP}\cdot I_{AP}\cdot\cos\theta_A+V_{BP}\cdot I_{BP}\cdot\cos\theta_B+V_{CP}\cdot I_{CP}\cdot\cos\theta_C \tag{1.1.7-68}$$

式中：V_{AP}、V_{BP}、V_{CP}——三相相电压有效值；

I_{AP}、I_{BP}、I_{CP}——三相相电流有效值；

θ_A、θ_B、θ_C——相电压与相电流之间的相角。

在对称三相电路中，无论是星形或三角形联接，均有

$$P=\sqrt{3}V_l\cdot I_l\cdot\cos\theta \tag{1.1.7-69}$$

式中，V_l、I_l分别为线电压和线电流，$\cos\theta$为每相功率因数。

6.5 三相电路的计算原则

在对称的三相电路中，无论电路如何复杂，也无论是星形或三角形联接，只要计算其一相即可，其它两相的计算结果可利用对称关系得到。对于一个相的电路计算方法，完全与单相电路相同。

对于不对称的三相电路，必须就每一相进行计算。或利用其它的方法如对称分量法。

例：负载接成星形的三相电路(图 1.1.7-34)，对称电源线电压为 380 V，每相负载阻抗 $Z=8+j6\ \Omega$求：1)负载端的相电压及相电流；

2)当C相负载短路时，其余两相的相电压和相电流；

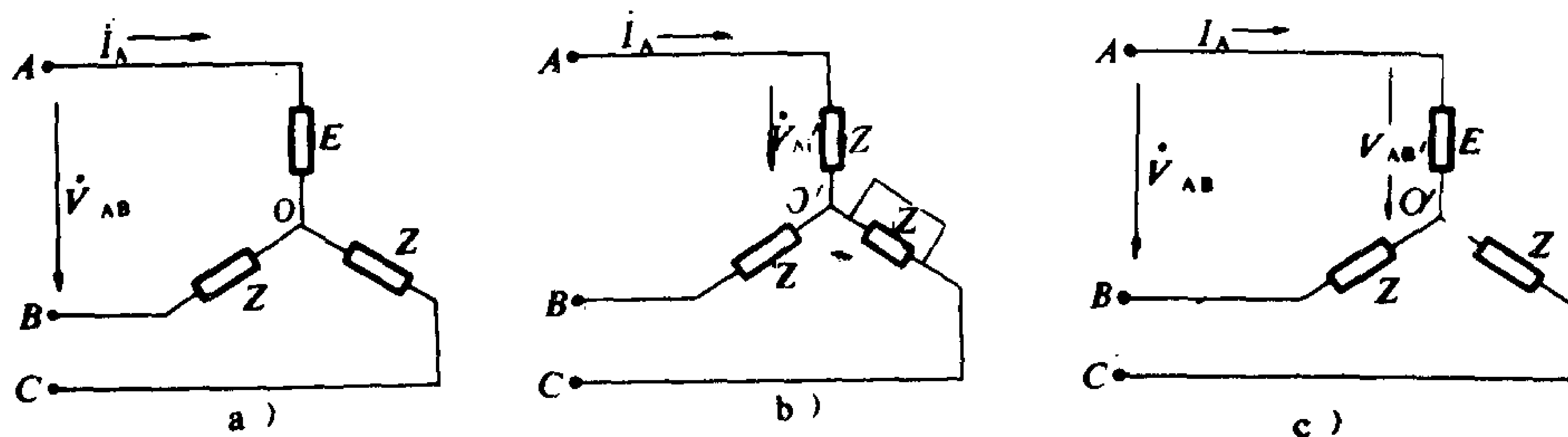


图 1.1.7-34 三相电路计算图例

3)当C相负载断路时，其余两相的相电压和相电流。

解：1)对称情况，只要计算其中的一相即可。现取A相计算

$$I_A=\frac{V_{AO}}{z_A}=\frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\times 380}{\sqrt{8^2+6^2}}=22\ A$$

因$I_A=I_B=I_C$，故其余两相电流$I_B=I_C=22\ A$。

三个相电压为

$$V_{AO}=V_{BO}=V_{CO}=\frac{1}{\sqrt{3}}\times 380=220\ V$$

2)当C相负载短路时(图b)，有

$$\dot{I}_A=\frac{\dot{V}_{AC}}{Z}=\frac{-\dot{V}_{CA}}{Z}$$

令 $\dot{V}_{AB}=380\underline{|0^\circ}\text{V}$；$\dot{V}_{BC}=380\underline{|-120^\circ}\text{V}$；$\dot{V}_{CA}=380\underline{|120^\circ}\text{V}$

则得：

$$\dot{I}_A=\frac{-\dot{V}_{CA}}{Z}=\frac{380\underline{|120^\circ+180^\circ}}{10\ \underline{|36.9^\circ}}=38\underline{|263.1^\circ}$$

$$\therefore I_A=38\ A$$

$$\dot{I}_B=\frac{\dot{V}_{BC}}{Z}=\frac{380\ \underline{|120^\circ}}{10\underline{|36.9^\circ}}=38\underline{|-156.9^\circ}$$

$$\therefore I_B=38\ A$$

$$\dot{I}_C=-(\dot{I}_A+\dot{I}_B)=66\underline{|53^\circ}$$

$$\therefore I_C=66\ A$$

3)当C相断路时(图c)，则AB两相负载串联地接在线电压 V_{AB}上。由于两相阻抗完全相同，故有

$$V'_{AO}=V'_{BO}=\frac{1}{2}\times 380$$

$$=190\ V$$

于是求得这两相的电流为

$$I_A = I_B = \frac{190}{10} = 19\ A$$

7　电路的暂态

7.1　暂态的起因

电路的暂态又称为电路的过渡过程。暂态只能在有着储能元件(L、C)的电路中才会出现，它是由于电路的“换路”引起的。

7.1.1　换路与换路定律

电路的接通、断开、接法上的改变、电路参数或电源(电压或电流)的骤变等等统称为“换路”。

由于储能元件中的储能是不能突变的，所以在电路的换路瞬间($t=0_-$到$t=0_+$)，一般说来，电路的状态也不能突变。由此得换路定律如下：

换路定律一　换路前的瞬间($t=0_-$)，任何电感中的电流$i_L(0_-)$及其磁链$\psi(0_-)$应等于换路后的瞬间($t=0_+$)电流$i_L(0_+)$及其磁链$\psi(0_+)$即：

$$\begin{aligned} i_L(0_-) &= i_L(0_+) \\ \psi(0_-) &= \psi(0_+) \end{aligned} \tag{1.1.7-70}$$

换路定律二　换路前的瞬间($t=0_-$)，电容上的电压$v_C(0_-)$及极板上的电荷$q(0_-)$应分别等于换路后的瞬间($t=0_+$)的电压$v_C(0_+)$及电荷$q(0_+)$，即：

$$\begin{aligned} v_C(0_-) &= v_C(0_+) \\ q(0_-) &= q(0_+) \end{aligned} \tag{1.1.7-71}$$

7.2　暂态过程的微分方程及其解法

对于任何集中参数的线性电路来说，研究过渡过程的问题，归根到底是列写该电路的线性微分方程及求解该微分方程。在一般情况下，线性电路的微分方程有着如下的形式

$$a_n\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1\frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \tag{1.1.7-72}$$

式中，$y(t)$为待求函数，称为电路的全响应。它可以是支路电流、网孔电流或节点电位等。$x(t)$是已知函数，称为电路的激励，它可以是电压源、电流源等等。a_n、$a_{n-1}\cdots a_1$、a_0等是常系数。在求解微分方程的过程中，初始条件由换路定律来确定。

电路微分方程的解法，一般可表示为下面的两种形式

全响应＝零输入响应＋零状态响应

全响应＝稳态响应＋暂态响应

7.2.1　零输入响应

它是在电路没有输入时，由任意初始状态(例如电容器上的初始电压)所产生的响应，它是由储能元件中的储能造成的结果。

7.2.2　零状态响应

它是在电路的初始条件为零时，储能元件中没有储能的条件下，由外界激励所引起的响

应。

7.2.3 稳态响应

它是电路的稳态解，它表示了电路的稳态行为。稳态响应是由外界激励引起的，它的波形与激励的波形密切相关。若激励为直流，则稳态响应也是直流。若激励为正弦交流，则稳态响应也是同频率的正弦交流。

7.2.4 暂态响应

它是由于激励和电路内部的储能突然作用的结果。

例：电路如图 1.1.7-35 所示。设电容器上的初始电压为 V_0，$i_s(t)=I$ 为一恒流源。若将开关 K 由 a 投向 b，可列出电容器上的电压 v_c 的微分方程为

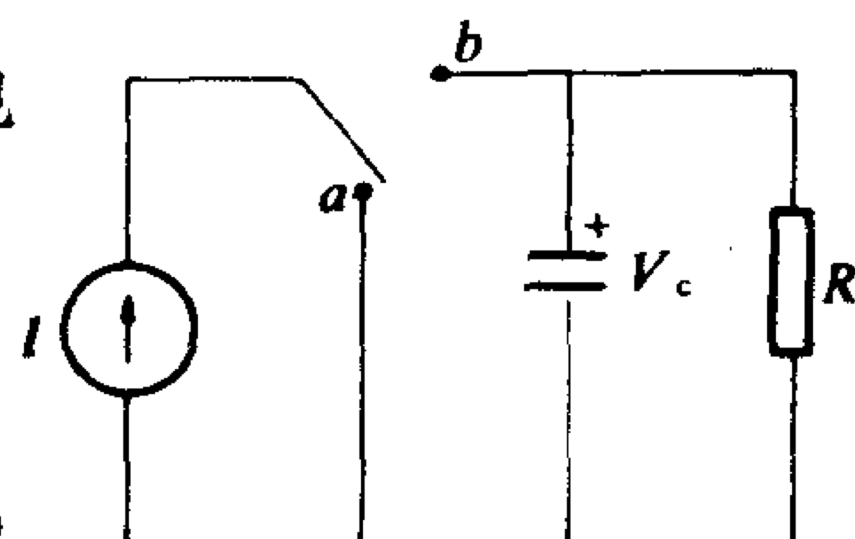


图 1.1.7-35　暂态计算图例

$$c\frac{dv_c}{dt}+\frac{v_c}{R}=I$$

解得
$$v_c=V_0e^{-t/RC}+IR(1-e^{-t/RC}) \qquad (1.1.7\text{-}73)$$

上式中，全响应包括两项：第一项 $V_0e^{-t/RC}$，显然是激励 I 为零时的全响应，它就是零输入响应，是按指数规律衰减的项。衰减的快慢，决定于时间常数 $\tau=RC$。第二项 $IR(1-e^{-t/RC})$ 是当 $V_0=0$ 时的全响应，它就是零状态响应。

若将式 1.1.7-73 重新组合成

$$v_c=(V_0-IR)e^{-t/RC}+IR \qquad (1.1.7\text{-}74)$$

由上式所表示的全响应也包括两项。第一项 $(V_0-IR)e^{-t/RC}$，当 $t=\infty$ 时，变为零，于是全响应只剩下与激励 I 成正比的项 IR。所以第一项称为暂态响应，第二项称为稳态响应。

7.2.5 三要素法

只含有一个储能元件（L 或 C）的电路，或者可以简化成只有一个等效储能元件的电路，这种电路的线性微分方程是一阶的，称为一阶电路。

对于一阶常系数线性微分方程，可以导出其解的一般化公式。直接用它就能写出全响应。这种方法通常称为三要素法。三要素法只适用于当激励为直流和正弦交流时的情况。

对于直流，有

$$x(t)=x(\infty)+[x(0_+)-x(\infty)]\ e^{-t/\tau} \qquad (1.1.7\text{-}75)$$

式中：$x(\infty)$——稳态响应，它可由直流电路的计算方法求得；

$x(0_+)$——初始值，可根据换路定律求得；

τ——时间常数。对于 RC 电路，$\tau=RC$。对于 RL 电路，$\tau=L/R$。

对于正弦交流，有

$$x(t)=x_s(t)+[x(0_+)-x_s(0_+)]^{-t/\tau} \qquad (1.1.7\text{-}76)$$

式中：$x_s(t)$——稳态分量，由稳态正弦交流电路的方法求得；

$x_s(0_+)$——稳态分量当 $t=0$ 时的值；

$x(0_+)$——初始值；

τ——时间常数。

7.2.6 时间常数

时间常数 τ 的大小反映了暂态分量衰减的快慢。实际上，当 $t=(4\sim5)\tau$ 时，可以认为暂态分量已消失，电路进入新的稳态。时间常数具有时间的量纲。若 R、L、C 的单位分别是Ω、H

和F，则τ的单位为s。

8 铁磁材料和磁路

8.1 铁磁材料的磁性能

铁磁物质虽然只有铁、镍、钴等几种，但它们的组合(合金)却很多，并且都具有铁磁性。铁磁物质的磁性能主要表现为高导磁率、导磁率呈非线性以及在反复磁化过程中有磁滞现象和磁滞耗损。

8.1.1 磁化曲线

铁磁材料的B-H曲线称为磁化曲线，它反映了铁磁物质的磁化程度随外磁场变化的规律。各种铁磁材料的磁化曲线各不相同，但它们的形状相似。铁磁材料磁化曲线的一个显著特点是饱和现象。当铁磁质进入饱和后，H进一步增加时，B几乎不再增加。

工程计算中所用的磁化曲线，是一种基本磁化曲线，是将一系列磁滞回线顶点联起来的曲线。图1.1.7-36示出几种热轧硅钢片和生铁等的基本磁化曲线。

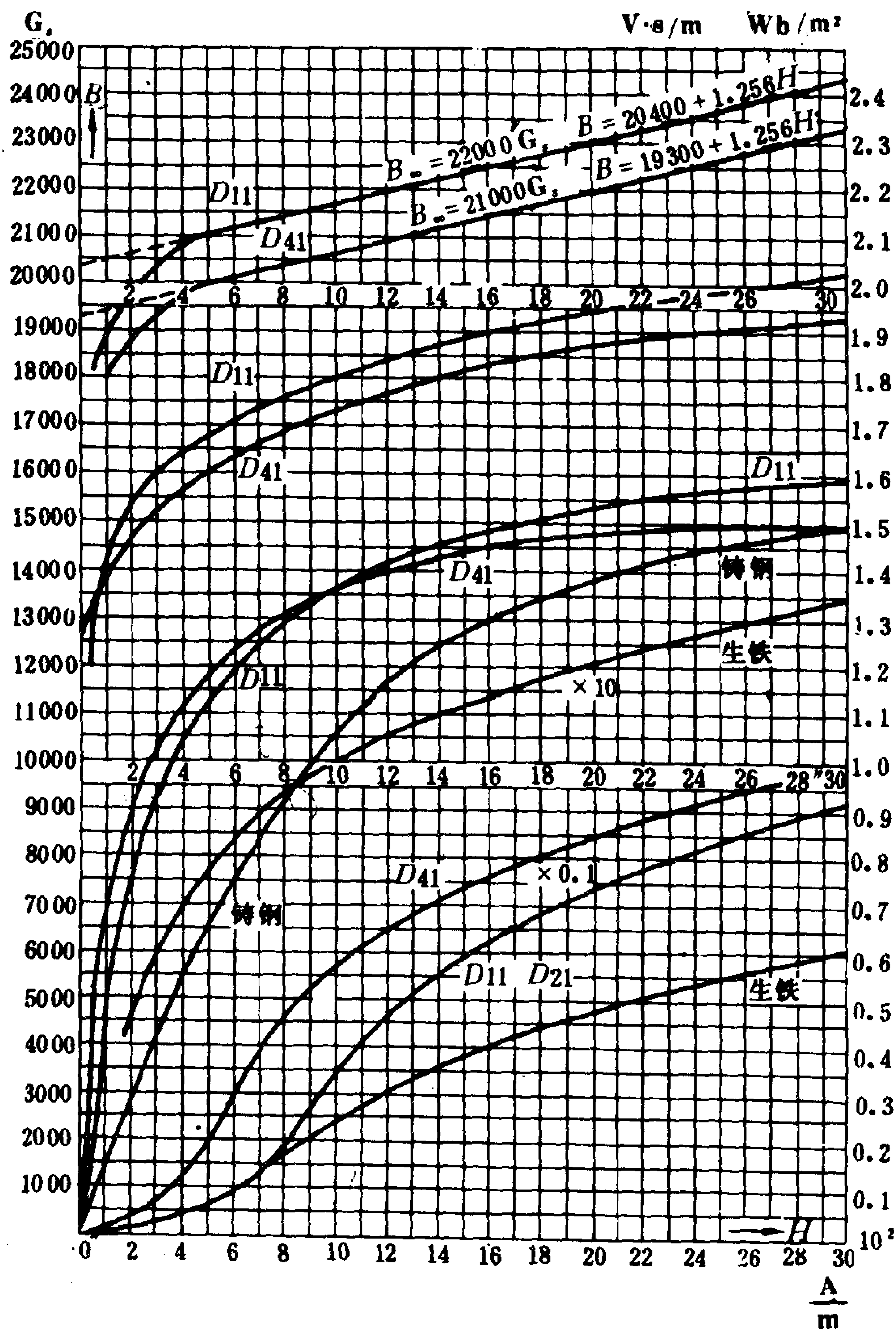


图1.1.7-36 几种热轧硅钢和生铁的基本磁化曲线

8.1.2 磁滞回线

磁滞是铁磁物质的一种重要特性。铁磁材料在交变磁场内反复磁化的过程中，其磁化曲线是一种具有方向性的闭合曲线，称磁滞回线。磁滞回线的一般形状见图1.1.7-37。图中，B_r和H_c分别称为剩磁和矫顽磁力，是铁磁材料的重要参数。

8.1.3 磁滞损失

磁滞损失是由磁滞现象引起的。损失的大小与磁滞回线的面积成正比。磁滞损失的结果导致铁心发热。引起发热的原因，铁芯在交变磁场作用下除了磁滞损失外，还有涡流损失，这两种损失合起来统称为铁损。

在电机和变压器中，以及其它的交流电器的铁心

中，通常将磁滞损失和涡流损失合并在一起计算，以P_{Fe}表示。

$$P_{Fe}=p_{1/50}\cdot(\frac{f}{50})^{\beta}\cdot B^{2}_{m}\cdot G \quad (1.1.7\text{-}77)$$

式中：$p_{1/50}$——铁损系数(或称比损耗)，它表示当$B_m=1\,T$、$f=50\,Hz$时，每千克硅钢片的损耗，可以从硅钢片的产品目录中查得；

β——指数，一般取1.2～1.6；

G——铁心的重量kg。

8.1.4 软磁材料

软磁材料的磁滞回线较窄，如图1.1.7-37a所示。它具有较小的矫顽力($H_C<10^2A/m$)和剩磁，磁滞现象也不显著，因而在交变磁场中的磁滞损失较小。它适宜于用来制造交流电器的铁心。一般的直流铁磁器件的铁心也用软磁材料。表1.1.7-9示出几种软磁材料的主要性能

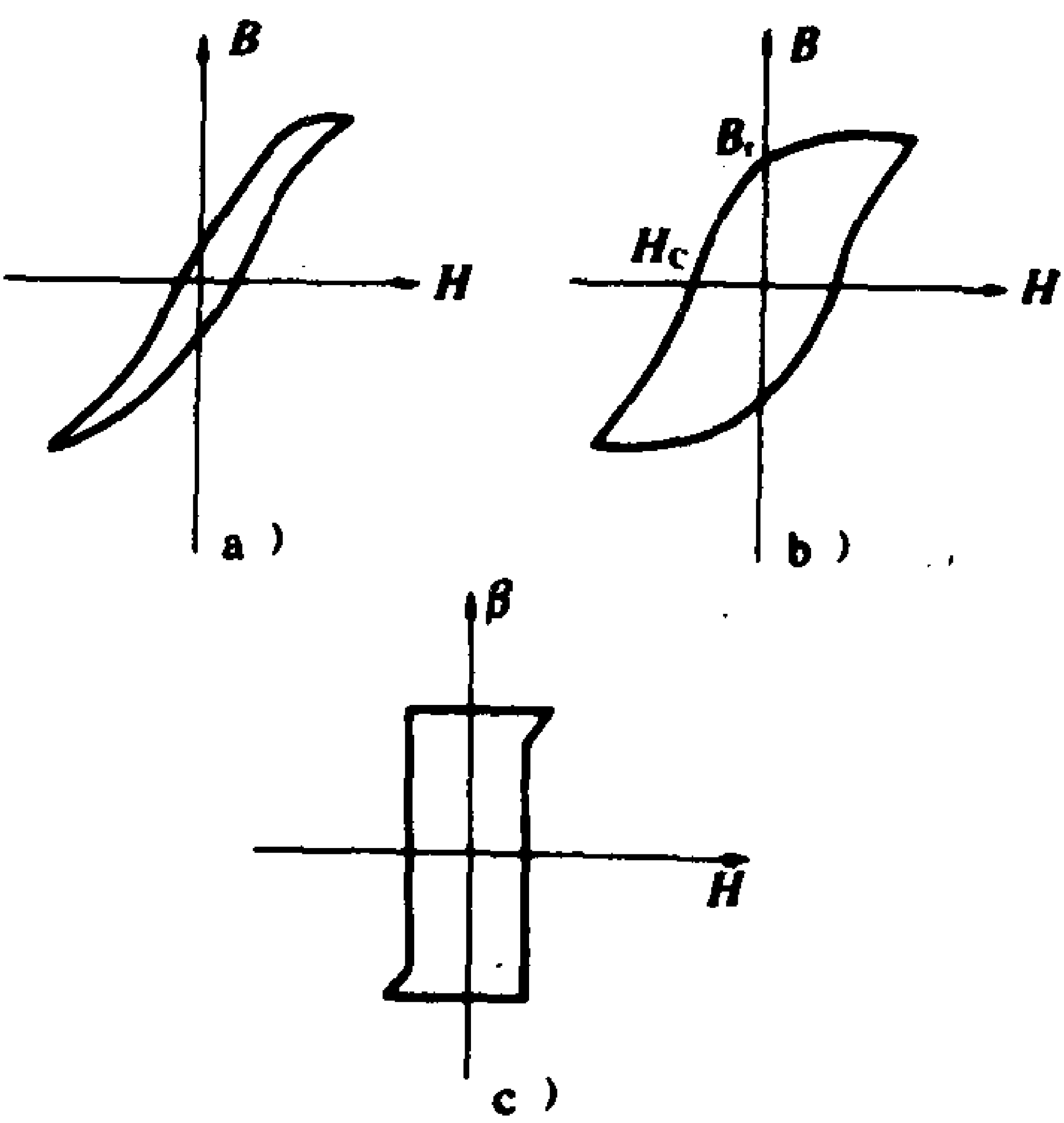


图1.1.7-37　磁滞回线的一般形状

表1.1.7-9　　几种软磁材料的主要性能

材料名称	初始相对导磁率μ_{rI}	最大相对导磁率μ_{rm}	H_C A/m (Oe)	B_r Wb/m² (G)	B_m Wb/m²(G)
电解铁	1,000	20,000	7(0.09)		2.15(21,500)
电磁纯铁		>15,000	<96(0.12)		71.8(18,000)
铸铁		200	880-1040(11-13)	0.475-0.500 (4,750-5,000)	2.16(21,600)
硅钢(热轧)	450	8,000	48(0.6)	0.8-1.2 (8,000-12,000)	1.95(19,500)
硅钢(冷轧，单取向)	600	10,000	16(0.2)		2(20,000)
坡莫合金(78.5%Ni)	9,000	100,000	4(0.05)	1.1-1.4 (11,000-14,000)	1(10,000)
锰锌铁氧体	300-5,000		16(0.2)		0.3(3,000)
镍锌铁氧体	5-1,200		32(0.4)		0.35(3,500)

8.1.5 硬磁材料

硬磁材料的磁滞回线较宽(图1.1.7-37 b)，具有较大的矫顽力($H_C>10^4A/m$)和剩磁，磁滞现象显著。表征硬磁材料性能的指标，除了B_r和H_c外，还有一个指标，称为最大磁能积。它是磁滞回线的退磁曲线段上B和H乘积的最大值$(B\cdot H)_m$。硬磁材料是制造永久磁铁的主要材料。表1.1.7-10示出几种主要硬磁材料的性能。

表 1.1.7-10　　**几种硬磁材料的主要性能**

材　　料	成　分　%	H_c(A/m) (Oe)	B_r(T) (G)	$(BH)_m J/m^2$ (Oe·G)
碳　钢	C 0.9, Mn 1，余为Fe	$2.4-3.2\times10^3$ (30−40)	0.8−0.91 (8000−9100)	1.6×10^3 (0.2×10^6)
钨　钢	C 0.7, Mn 0.5, Cr 0.5, W 6，余为Fe	5.6×10^3 (70)	0.9 (9000)	2.4×10^3 (0.3×10^6)
铝镍钴 3 #	Al 13, Ni 25, Cu 3, Fe 59	$28-32\times10^3$ (350−400)	0.7−0.9 (7000−9000)	$9.5-13.5\times10^3$ $(1.2-1.7)\times10^6$
铝镍钴 5 #	Al 8, Ni 14, Co 24, Cu 3, Fe 51	52×10^3 (650)	1.2 (12000)	60×10^3 (7.5×10^6)
铝镍钴 8 #	Al 7, Ni 15, Co 34, Cu 4, Ti 5, Fe 35	115×10^3 (1450)	1 (10000)	82×10^3 (9×10^6)
钡铁氧体	$BaO\cdot6Fe_2O_3$	160×10^3 (2000)	0.45 (4500)	36×10^3 (4.6×10^6)
锶铁氧体	$SrO\cdot6Fe_2O_3$	240×10^3 (3000)	0.35 (3500)	32×10^3 (4.1×10^6)
稀土钴	$PrCO_5$	280×10^3 (3500)	0.49 (4900)	34.7×10^3 (4.35×10^6)
	$SmCO_5$	2000×10^3 (25000)	0.9 (9000)	160×10^3 (20×10^6)

8.1.6　矩磁材料

矩磁材料的磁滞回线接近矩形(图 1.1.7-37 c)。通常用剩磁比$R=B_r/B_m$来表征矩磁材料的矩形度。一般磁性材料的剩磁比大约为 0.5，而矩磁材料的剩磁比大于 0.8。在金属矩磁材料中，坡莫合金是最重要的一种。其它的如锂锰铁氧体，镁锰铁氧体也都是矩磁材料。

8.2　磁路计算

磁路计算所用到的公式与电路计算的公式在形式上很相似(表 1.1.7-11)。然而由于铁

表 1.1.7-11　　**电路与磁路基本公式的比较**

电　路		磁　路	
电　流	I	磁　通	ϕ
电动势	E	磁动势	F
电导率	σ	磁导率	μ
电　阻	$R=l/\sigma\cdot s$	磁　阻	$R_m=l/\mu\cdot s$
电压降	$V=IR$	磁压降	$Hl=\phi R_m$
欧姆定律	$I=E/R$	磁路欧姆定律	$\phi=F/R_m$
KCL	$\Sigma I=0$	磁路KCL	$\Sigma\phi=0$
KVL	$\Sigma IR=\Sigma E$	磁路KVL	$\Sigma Hl=\Sigma IN$

磁材料的导磁率并非常数，而且还有磁滞现象和漏磁等，对于交流电路，还要考虑到铁损的影响。因此，磁路的计算要比电路计算困难，而且较难获得高精确度。在实际的计算中，往往需要根据问题的性质，忽略掉一些诸如漏磁、磁滞等的因素，以简化计算过程。

磁路的计算可以归纳成两类。一类是在已知磁路的结构形式、几何尺寸及磁路材料的条件下，给定磁通ϕ，求安匝IN的问题。另一类是给定安匝IN，求磁通ϕ的反算问题。一般来

说，反算问题更为困难些。近年来，由于计算机的推广应用，给解算复杂的磁路问题提供了极大的方便。

8.2.1 气隙磁导

在磁路计算中，气隙的磁阻是用气隙的磁导来表示的。气隙磁导与形成气隙的导磁体的几何形状和它们的相对位置有关。

两平行面之间的气隙磁导，当气隙边缘磁通的扩散作用忽略不计时，可用下式表示

$$G_\delta=\frac{\mu_0 S}{\delta} \qquad (1.1.7\text{-}78)$$

式中，面积S的单位是m^2、气隙长度的单位是m，空气的导磁率$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$Wb/(A·M)，则磁导G_δ的单位为H。

表1.1.7-12示出常用气隙磁导的公式。

表1.1.7-12 常用气隙磁导公式

编号	几何图形	磁极形状	磁导或单位长度磁导
1		锥形磁极	$G_\delta=\frac{\mu_0\pi d}{2\delta\cos\alpha}\left(\delta\sin\alpha-\frac{d}{2\cos\alpha}\right)$
2		圆柱铁心和平板衔铁	$G_\delta=\mu_0\frac{2\pi R}{\theta}\left(1-\sqrt{1-\frac{r^2}{R^2}}\right)$ θ单位用弧度
3		矩形铁心和平板衔铁	$G_\delta=\frac{\mu_0 b}{\theta}\ln\frac{R_2}{R_1}$ θ单位用弧度
4		圆筒与同心圆柱体	$g=\frac{G_\delta}{l}=\frac{2\pi\mu_0}{\ln\frac{R}{r}}$ 当$r\gg\delta$ $g=\frac{2\pi\left(r+\frac{\delta}{2}\right)\mu_0}{2\delta}$

续上表

编号	几何图形	磁极形状	磁导或单位长度磁导
5	[图]	具有θ角的两同心圆面	$g=\dfrac{\theta\mu_0}{\ln\dfrac{R}{r}}$ 当$r\gg\delta$ $g=\dfrac{(r+\dfrac{\delta}{2})\theta\mu_0}{2\delta}$
6	[图]	U形磁路铁心柱之间	$g=\dfrac{G\sigma}{l}$ $=\mu_0\left(\dfrac{b}{c}+\dfrac{2a}{c+\dfrac{\pi a}{2}}\right)$

8.2.2 磁路计算举例

一直流磁路如图 1.1.7-38 所示。铁心由铸钢制成，各段平均长度和铁心截面积为：$l_1=l_3=200\,\text{mm}$，$l_2=l_4=300\,\text{mm}$

气隙$\delta=2\,\text{mm}$、$S_1=400\,\text{mm}^2$, $S_2=S_4=200\,\text{mm}^2$, $S_3=600\,\text{mm}^2$

设磁路要求有磁通 2.4×10^{-4}Wb。若不计及气隙边缘的磁通扩散，求线圈安匝

解：1)求气隙磁导G_δ

根据公式 1.1.7-78，得

$$G_\delta=\frac{\mu_0 S}{\delta}=\frac{4\pi\times10^{-7}\times200\times10^{-6}}{2\times10^{-3}}=12.57\times10^{-8}H$$

2)求各截面中的磁感应强度B

$$B_1=\frac{\phi}{S_1}=\frac{2.4\times10^{-4}}{400\times10^{-6}}=0.6\text{ T}$$

$$B_2=B_4=\frac{\phi}{s_2}=\frac{2.4\times10^{-4}}{200\times10^{-6}}=1.2\text{ T}$$

$$B_3=\frac{\phi}{S_3}=\frac{2.4\times10^{-4}}{600\times10^{-6}}=0.4\text{ T}$$

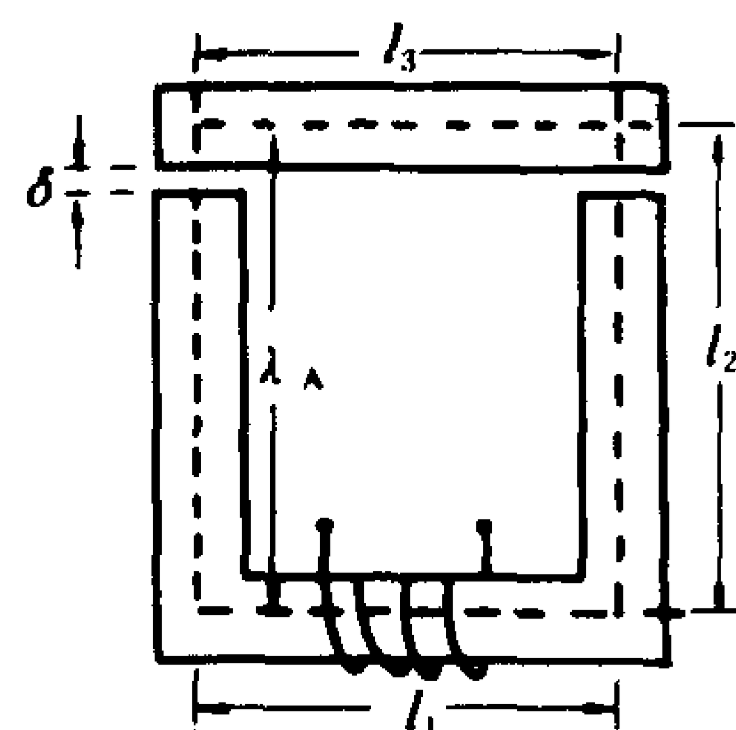


图 1.1.7-38 磁路计算图例

3)求各段磁路所需要的H

由图 1.1.7-36 中所示的铸钢磁化曲线，查得

$H_1=4.5\times10^2\text{A/m}$

$H_2=H_4=13\times10^2\text{A/m}$

$H_3=3\times10^2\text{A/m}$

4)根据磁路KVL，对该磁路可写成

$$IN=H_1l_1+H_2l_2+H_3l_3+H_4l_4+2\times\frac{\phi}{G_S}$$

$$=4.5\times10^2\times0.2+13\times10^2\times0.3\times2+3\times10^2\times0.2+\frac{2.4\times10^{-4}}{12.57\times10^{-8}}\times2$$

$$=4{,}530$$

8.2.3 交流磁路的特点

交流磁路的计算，也和直流磁路的计算一样，必须遵守磁路的基本定律。然而，由于交流磁路的励磁电流和磁通是交变的，铁心中还有铁损，这就使得对交流磁路的计算更为复杂与困难。但在实际中，是可以允许作简化后的近似计算的。

与直流电路相比，在作交流磁路计算时，应注意到它的特点。

1）交流磁路的恒磁链特性　交流磁路的励磁线圈实际上是一个交流铁芯线圈。若忽略线圈的电阻、漏磁及铁芯中的铁损等因素，则可得如式 1.1.7-79 所示的近似公式

$$V \approx 4.44 fN\phi_m \tag{1.1.7-79}$$

式中，V 为励磁线圈的外加电压；

f 为电源频率；

N 为线圈匝数；

ϕ_m为交变磁通最大值。

当励磁线圈的外加电压及频率一定时，磁路的磁链 $\psi = N\phi_m$ 也基本保持不变。这和直流磁路不同，在直流磁路中，若磁势保持不变，则磁链随磁路磁阻的改变（如气隙长度改变）而改变。

2）交流磁路的变安匝特性，若进一步忽略铁芯的磁阻而只考虑气隙的磁导G_δ，根据磁路欧姆定律，可有

$$\sqrt{2}NI = \frac{\phi_m}{G\delta} \tag{1.1.7-80}$$

式中，I 为线圈中电流的有效值。

根据公式(1.1.7-79)及(1.1.7-80)可得励磁电流

$$I = \frac{V}{\sqrt{2}\cdot 4\cdot 44 fN^2 G_\delta} \tag{1.1.7-81}$$

上式表明，当气隙磁导改变时，励磁线圈中的电流大致和气隙磁导成反比。即它的安匝是随着磁导的改变而改变。这也和直流磁路不同。在直流磁路中，励磁电流仅决定于外加电压和线圈的电阻，而与气隙磁导无关。

作交流磁路计算时，因线圈电流、磁路中的磁通、磁感应强度都是交变量，而铁芯的饱和程度与磁感应强度的幅值有关，所以在计算中，磁通和磁感应强度用幅值ϕ_m和B_m表示，而电流和磁场强度则用有效值I和H表示。

8.3 电磁铁吸力的近似估算

表 1.1.7-13 列出几种常见的磁路结构的电磁铁吸力近似估算公式。

表中：N——匝数；

IN——直流安匝；

f——频率；

g——气隙单位长度磁导，可按表 1.1.7-12 的公式计算；

δ——气隙长度(cm)；

S——心柱截面积$(cm)^2$；

F——吸引力(N)。

表 1.1.7-13 **电磁铁吸力的近似估算公式**

结构形式	吸引力	
	直流励磁	交流励磁
合拍式电磁铁	$F=64(IN)^2\frac{S}{\delta^2}\times10^{-8}$	$F=0.4\times\left(\frac{V\times10^4}{fN}\right)^2\times\left(\frac{S}{S+\frac{1}{3\mu_0}l\cdot g\delta}\right)^2$ 注：g按表 1.1.7-12 第 6 项计算
U型电磁铁	$F=32(IN)^2\frac{S}{\delta^2}\times10^{-8}$	$F=0.2\times\left(\frac{V\times10^4}{fN}\right)^2\times\frac{S}{\left(S+\frac{2}{3\mu_0}l\cdot g\delta\right)^2}$
E型电磁铁	若中柱截面 2 倍于边柱截面，则可看成两个U型电磁铁，计算公式同U型	若中柱截面 2 倍于边柱截面，则可看成两个U型电磁铁、计算公式同U型
螺管式电磁铁	$F=6.4(IN)^2\left[\frac{S}{\delta^2}+\frac{g}{\mu_0}\left(\frac{n}{l}\right)^2\right]\times10^{-8}$ 注：g按表 1.1.7-12 第 4 项计算	$F=\frac{\sqrt{2}V^2}{8\pi f^2N^2\left(\frac{\mu S}{\delta}+g\frac{m^3+m^3}{3l^2}\right)}\times\left(\frac{\mu S}{\delta^2}+g\frac{n^2}{l^2}\right)$ 注：g按表 1.1.7-12 第 4 项计算

参考文献

〔1〕高等工业学校物理学编写组编：〈物理学〉第二册，高等教育出版社，1957

〔2〕华中师范学院物理系电学教研室编：〈电学〉上册。人民教育出版社，1975

〔3〕秦曾煌主编：《电工学》上册，高等教育出版社，1981

〔4〕黄正中编：《电路时域分析》，人民教育出版社，1982

〔5〕高联辉编：《磁路和铁磁器件》，高等教育出版社，1983

〔6〕邱关源主编：《电路》（电工原理工），人民教育出版社，1978

〔7〕北京师范大学出版社编：《基础课程手册》，上册，北京师范大学出版社，1983

第 8 章 电子技术基础

1 半导体器件

1.1 半导体材料

1.1.1 本征半导体

目前用得最多的半导体是锗和硅。本征半导体是纯净具有晶体结构的半导体。在这种晶体结构中，每一个原子与相邻的 4 个原子结合。每一个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成一个电子对。这对价电子是每两个相邻原子共有的，把相邻原子结合在一起，构成共价键结构。在此结构中，虽然原子最外层有 8 个较稳定的电子，但在获得一定能量(受热或受光照）后，价电子即可能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，同时留下一个空穴，成为带正电的离子。电子和空穴是成对出现的，且温度愈高，电子—空穴对数量愈多。

1.1.2 N型半导体和P型半导体

本征半导体内部由于热运动，虽然存在着等量的电子和空穴，但由于数量极少，其导电系数仍然很小。如果在其中掺入微量的三价元素（例如硼）或五价元素（例如磷），将使其导电性能大大增强。由于每个磷原子的最外层 5 个价电子在同四价锗或硅原子的最外层 4 个价电子构成共价键后多余一个电子，所以在这种掺杂半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。这种掺杂半导体被称为电子(或N)型半导体。相反，如果掺入微量的三价硼元素，则因其同锗或硅原子的最外层 4 个价电子构成共价键后少一个电子而出现一个空穴，故空穴是多数载流子，电子是少数载流子。这种掺杂半导体被称为空穴（或P）型半导体。

1.2 PN结

1.2.1 PN结的形成

在一块单晶片上采取一定工艺措施，通过掺杂在单晶片上分别形成P型和N型半导体，如图 1.1.8-1 所示。由于交界面两侧载流子浓度的差异甚大，因此空穴要从P区向N区扩散，自由电子也要从N区向P区扩散，于是在交界面两侧附近的 P、N区，分别留下一层不能移动的带负电的三价杂质离子和带正电的五价杂质离子，形成负正空间电荷区。这就是PN结。在这一区域内，可移动的载流子极少，电阻率很高，多数载流子已扩散到对方而被复合，或被消耗尽了，故空间电荷区又称耗尽层。正负空间电荷区在交界面两侧形成的内电场，其方向为由N区指向P区，对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，故空间电荷区又称阻挡层。

空间电荷区的内电场对少数载流子，则可推动它越过该区进入对方。把这一运动称为少数载流子的漂移。这两种运动同处于空间电荷区内，处于动态平衡状态，区域的宽度也就基本稳定不变。

1.2.2 PN结的单向导电性

如图 1.1.8-2 a)所示那样给PN结加正向电压，外电场与内电场方向相反，使P区的空穴，N区的电子同时进入空间电荷区，分别抵消一部分负电荷和正电荷，使区域变窄，阻挡层作用

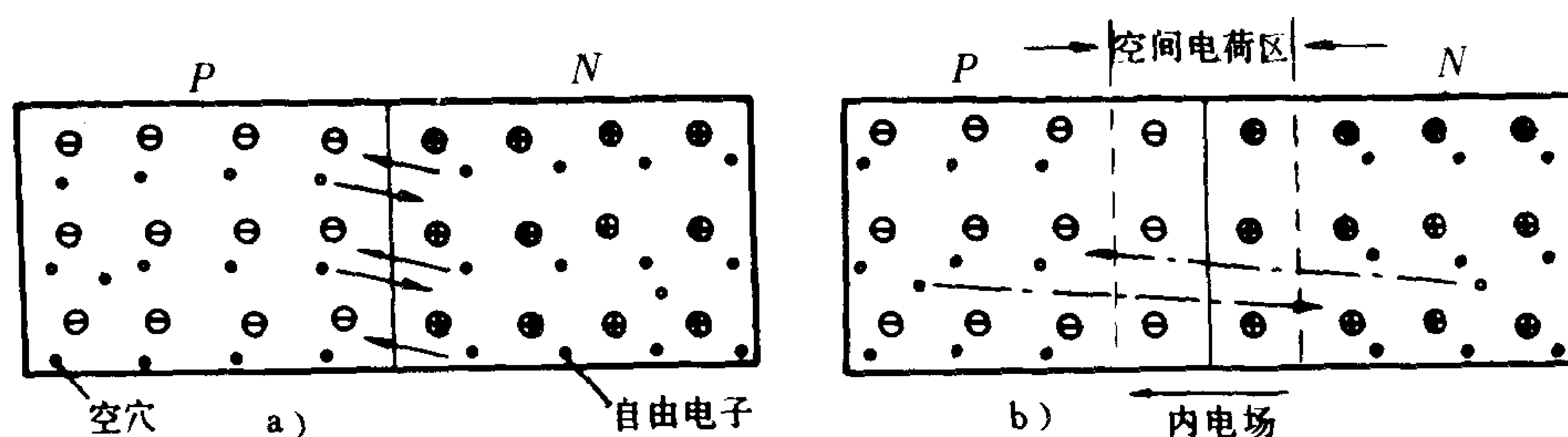


图 1.1.8-1 PN结的形成

a)多数载流子扩散; b)少数载流子漂移

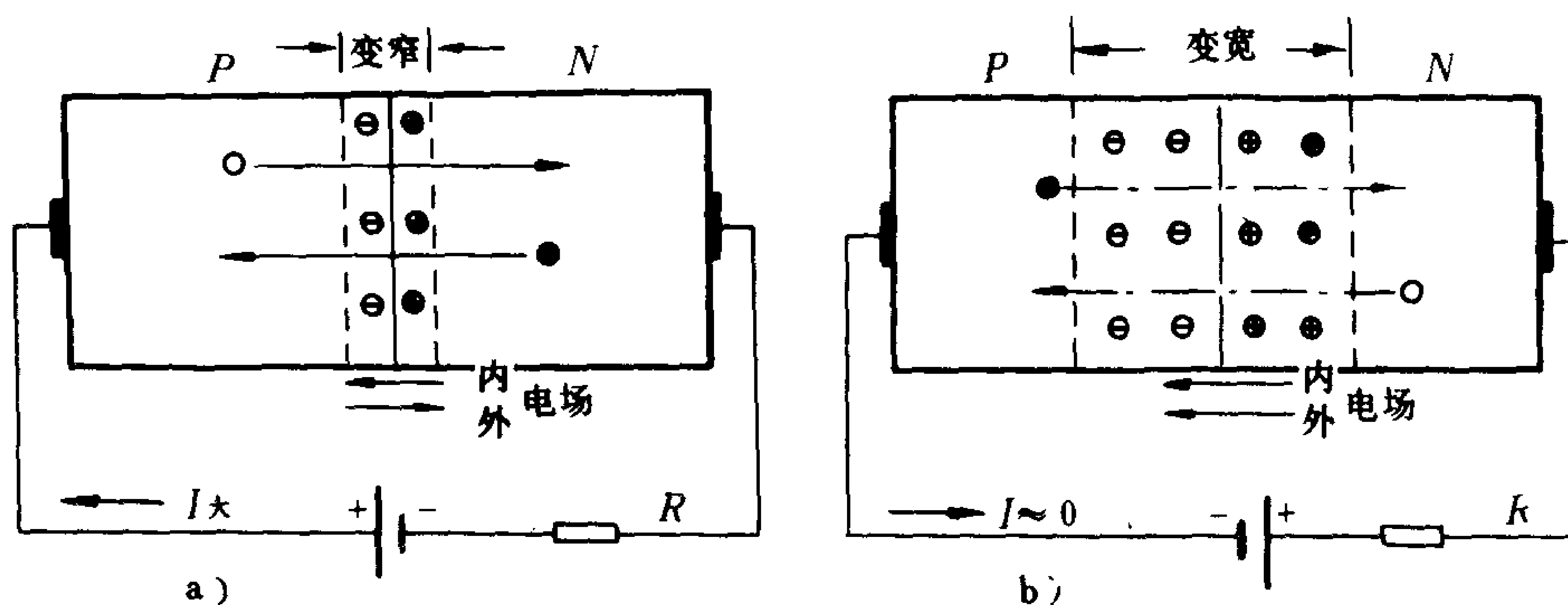


图 1.1.8-2 PN结厚度的变化

a)PN结正偏; b)PN结反偏

被削弱，多数载流子的扩散得以增强，形成较大的扩散（称正向）电流。且外电场愈强，阻挡层愈窄，PN结呈现的电阻愈小，正向电流也就愈大。如给PN结加反向电压，如图 1.1.8-2 b)，外电场与内电场的方向相同，驱使空间电荷区两侧有更多的空穴和电子移走，使区域变宽，沿内电场方向的场强增强，有利于少数载流子的漂移，并在外电场作用下，形成反向电流。由于热激发产生的少数载流子数量，虽然其反向电流不大，但与环境温度有密切关系：温度愈高，挣脱共价键束缚的少数载流子数量愈多，反向电流也就愈大。

1.3 半导体二极管

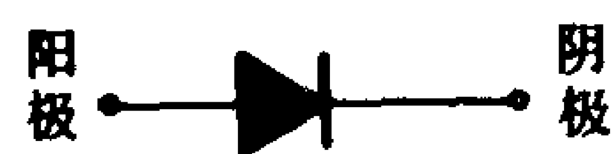


图 1.1.8-3 二极管符号

PN结装上相应的电极引线和管壳，就成为半导体二极管。二极管分为点接触和面接触两种类型。点接触型二极管的PN结结面积很小，只能通过数毫安的电流，但因其结电容小，高频特性较好，常用于高频电路；面接触型二极管的PN结结面积较大，可通过高达数千安的电流，但因其结电容很大，工作频率较低，一般用作工频整流、逆变。无论哪种管子，在电路中的表示符号都如图 1.1.8-3 所示。

1.3.1 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性，如图 1.1.8-4 所示，当正向电压很低时，外电场还不能克服PN结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，正向电流仍然很小。当正向电压超过一定值（硅管约 0.5 V，锗管约 0.2 V，称为死区电压）后，内电场被大大削弱，正向电流便随正向电压的升高而迅速增加。加反向电压，由于少数载流子的漂移运动形成的反向电流很小（几个微安），

且在反压一定范围内，与电压的大小几乎无关，故称为反向饱和电流。但这一电流的大小与环境温度有密切关系，温度升高，其值增大。使反向电流急剧增加的反向电压称为击穿电压。

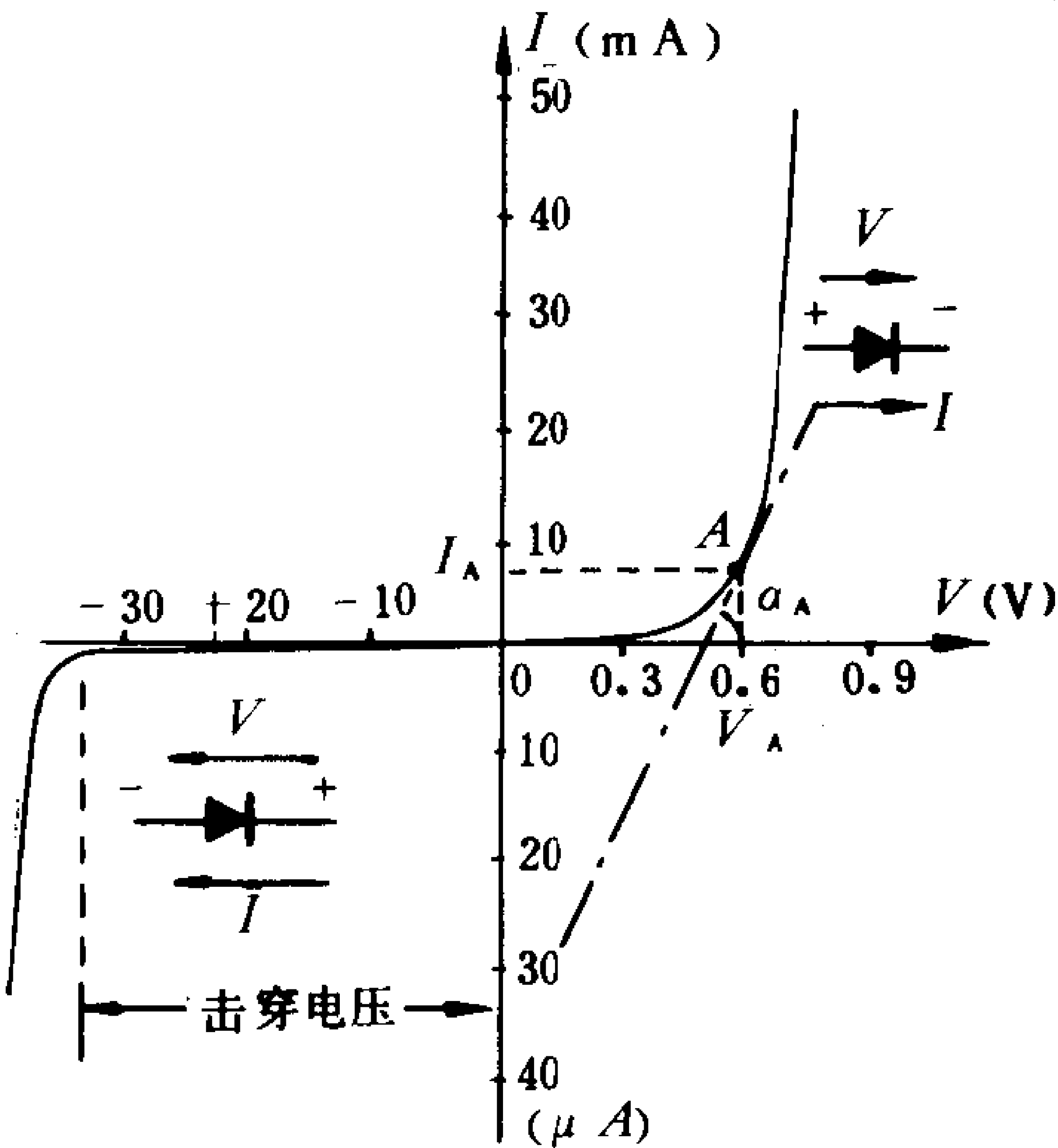


图 1.1.8-4 硅二极管的伏安特性曲线

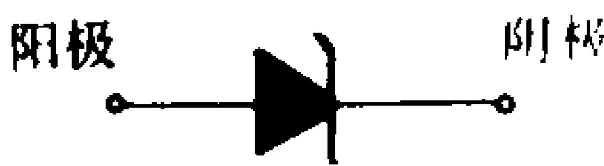


图 1.1.8-5 稳压管的符号

1.3.2 二极管的主要参数

最大整流电流I_{OM} 它是指二极管长时间使用允许流过的正向平均电流。如工作电流超过此值，将使PN结过热而损坏。

最大反向工作电压 V_{RM} 它是指二极管不致被击穿的最高反向电压，常取反向击穿电压的$\frac{1}{2}$～$\frac{2}{3}$。

最大反向电流I_{RM} 它是指二极管加最高反向工作电压时的反向电流。硅管的I_{RM}通常在数微安之内，锗管的约为硅管的数十至数百倍。

动态电阻r_d 它是指正向伏安特性曲线上某一点A的斜率的倒数。正向工作电流愈大，r_d愈小。r_d与工作电流I的关系大致是$\frac{26(\mathrm{mV})}{I(\mathrm{mA})}$。而把与$A$点对应的管压降$V_A$同电流$I_A$的比值，称为$A$点的静态电阻。

1.4 稳压管

稳压管是一种特殊面接触型半导体硅二极管。它的符号和伏安特性，如图 1.1.8-5、1.1.8-6所示。特性曲线与普通硅二极管的类似，只是反向特性较陡，动态内阻较小。稳压管常工作于反向击穿区。当稳压管反向电压超过击穿电压 V_z时，反向电流将急剧增加，而其两端电压的变化却甚小。将它与适当阻值的电阻串联起来，就可以起稳压作用。在最大工作电流I_{zmax}内，稳压管的反向击穿是可逆的。但如果电流超过允许范围，将导致热击穿而损坏。

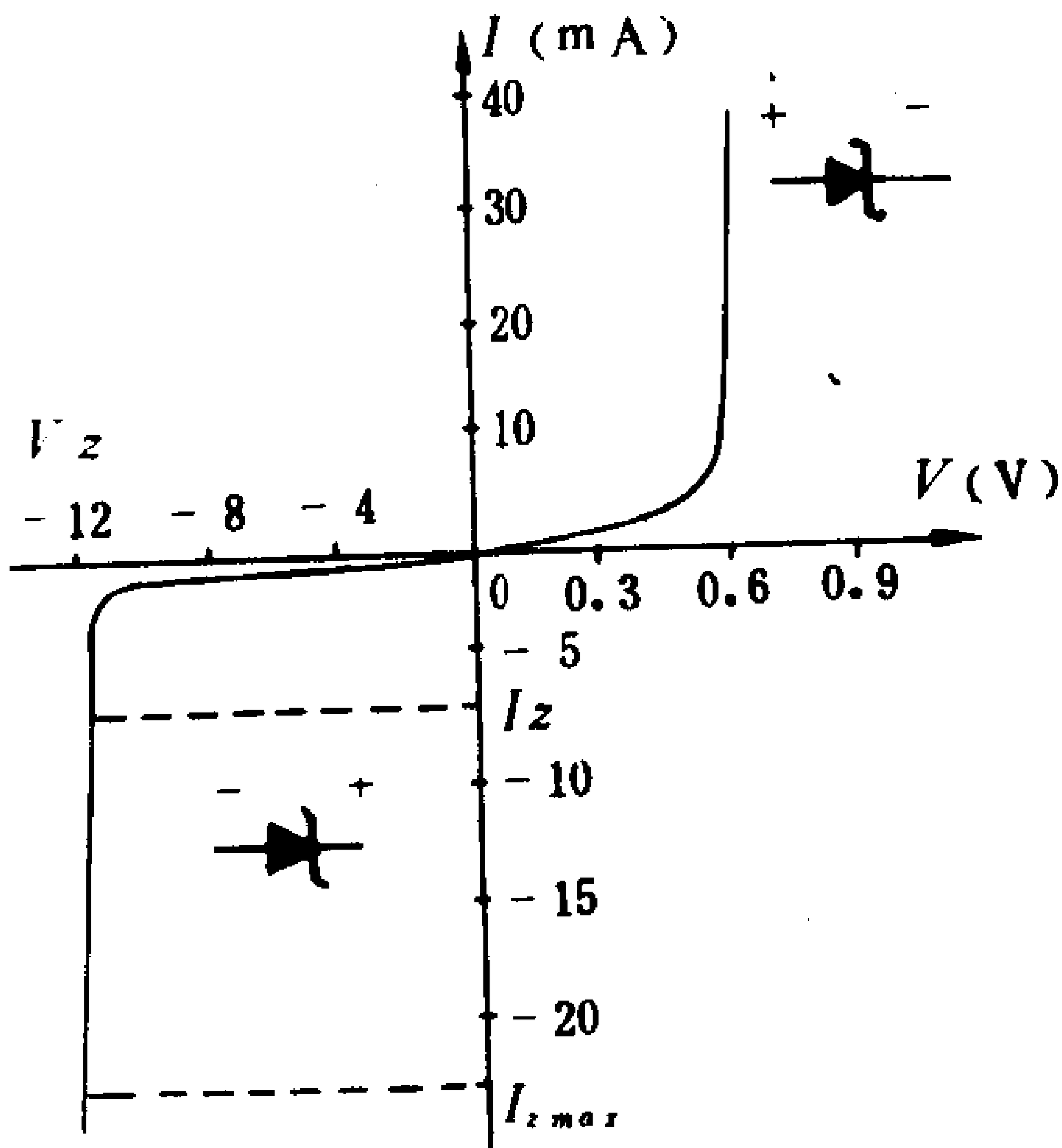


图 1.1.8-6 稳压管的伏安特性曲线

稳压管的主要参数有稳定电压 V_z、稳定电流I_z、电压温度系数α_V和动态内阻r_d。

稳定电压 V_z 它是指管子在正常工作条件下，加于管子两端的电压。

稳定电流I_z 它是指管子正常工作时的电流。低于I_z，稳压效果差；只要不超过额定功耗，高于I_z，稳压效果会更好些。

电压温度系数α_V 它是指温度每增加 1℃，稳定电压升高或降低的百分数。通常 V_z< 6 V的管子，α_V为负值；大于 6 V的为正值；6 V左右的管子，α_V最小。

动态内阻r_d 它是指反向伏安特性曲线斜率

的倒数。特性愈陡，r_d愈小，稳压性能愈好。

1.5 双极型晶体管

双极型晶体管是一种三层 PNP 或NPN 结构的半导体器件，其结构和符号，如图 1.1.8-7 所示。每一类都分为基区、发射区和集电区，分别引出基极B、发射极E和集电极C。每一类都有两个PN结，即发射结和集电结。

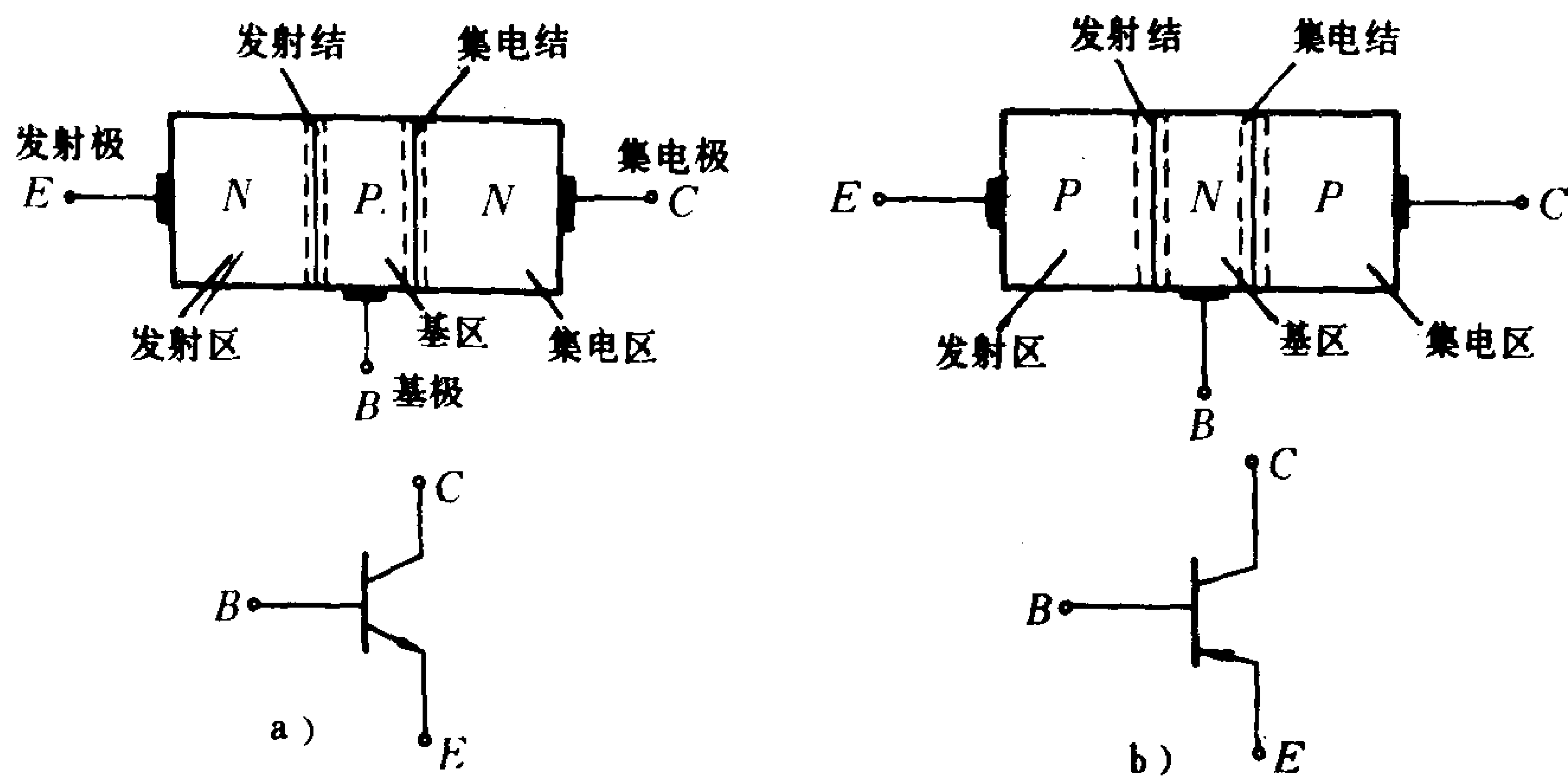


图 1.1.8-7 晶体管示意结构及符号
a)NPN型晶体管；b)PNP型晶体管

1.5.1 晶体管的电流放大原理

NPN型晶体管的电源E_C和E_B的极性，如图 1.1.8-8 所示，由于E_B小于E_C，故集电结反向偏置，发射结正向偏置。又由于基区很薄，掺空穴的浓度比发射区掺电子的浓度又低得多，因此从发射区扩散到基区的电子(由E_C补充电子形成发射极电流I_E)，除极少一部分与基区空穴相复合（由E_B向基区补充空穴）形成基极电流I_B的一部分I_{EB}外，绝大部分将迅速扩散到集电结边缘，并被集电结反向电压（指向基区的强电场）收集，形成集电极电流I_C的一部分I_{EC}。当发射结正向电压升高（减小R_B的阻值）时，发射结空间电荷区变窄，单位时间内将有更多的电子由发射区扩散到基区，I_E增加。但在形成ΔI_E的电子增量中，也仅有极少一部分与基区空穴相复合，形成ΔI_B，绝大部分也将渡越基区到达集电区，形成ΔI_C。这就是晶体管的电流放大原理。把$\beta=\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$称为晶体管的动态电流放大系数(或交流电流放大系数)。

此外，由于集电结反向偏置，在原有内电场方向上电场更强，更有利于集电区少数载流子空穴和基区少数载流子电子的漂移运动，形成反向饱和电流I_{CBO}。它是组成I_C和I_B的一小部分。由图 1.1.8-8 可知，$I_C=I_{EC}+I_{CBO}\approx I_{EC}$，$I_{EB}=I_B+I_{CBO}\approx I_B$。把$\bar{\beta}=\frac{I_{EC}}{I_{EB}}\approx\frac{I_C}{I_B}$称为晶体管的静态电流放大系数。

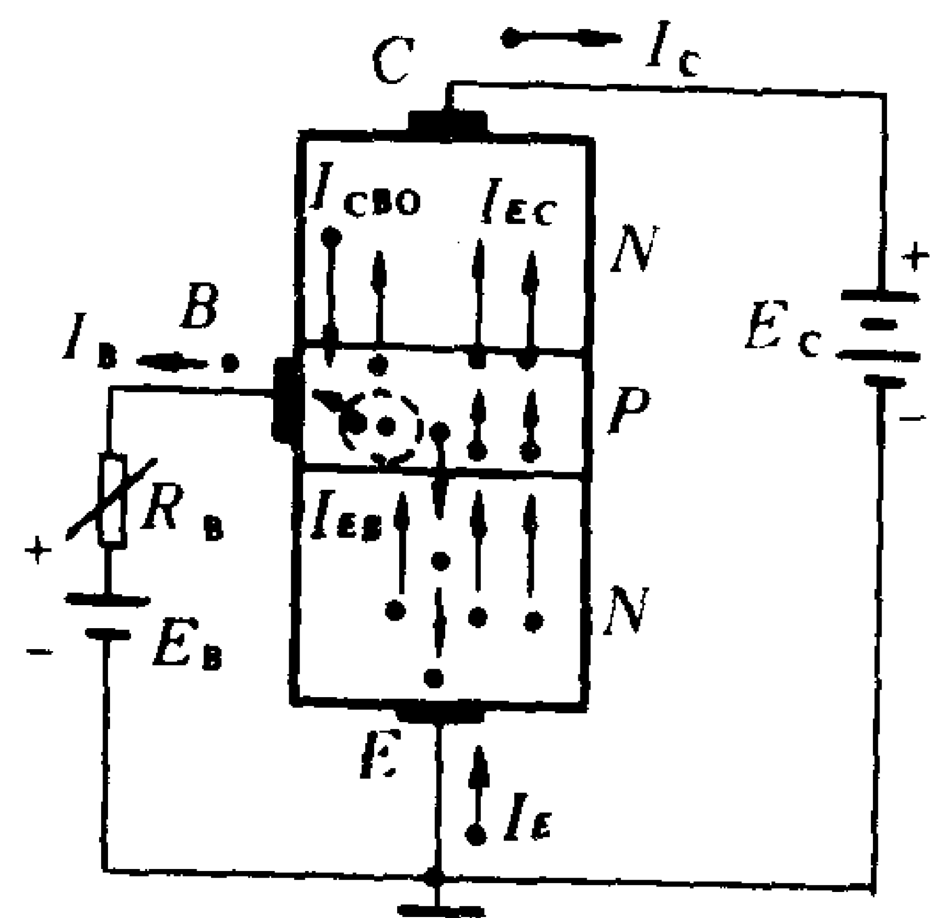


图 1.1.8-8 晶体管内部的载流子运动

另外，基区的多数载流子空穴也要向发射区扩散，形成发射极电流I_E的一部分(有两种载流子参与导电，这就是双极型晶

体管名称的由来），但基区掺空穴的浓度比发射区掺电子的浓度小得多，常将空穴电流忽略不计。

PNP型双极型晶体管的工作原理与NPN型的类似。只是 E_C、E_B两电源的极性都与NPN型的相反。这样才能使得发射结正偏，集电结反偏，而具有电流放大作用。发射极电流I_E中绝大部分是空穴导电，电子仅占极少一部分。

1.5.2　晶体管的特性曲线

晶体管的特性曲线是内部载流子运动的外部表现。它反映了晶体管的性能，是分析放大电路的重要依据。最常用的是共发射极接法的输入特性和输出特性。

输入特性曲线　它是指集-射极电压 V_{CE}一定时，基极电流I_B与基-射极电压 V_{BE}之间的关系，即$I_B=f(V_{BE})|V_{CE=const}$，如图 1.1.8-9 a）所示。对硅管而言，当$V_{CE}\geq 1V$时，集电结已经反偏，可以把从发射区扩散到基区的电子绝大部分地拉入到集电区。只要 V_{BE}保持不变，即使 V_{CE}增加，I_B也就基本不变，所以 $V_{CE}>1V$的一切输入特性曲线基本上与 $V_{CE}=1V$的相重合。在正常情况下，硅、锗管的发射结电压降分别约为 0.6～0.7 V和 0.2～0.3 V。

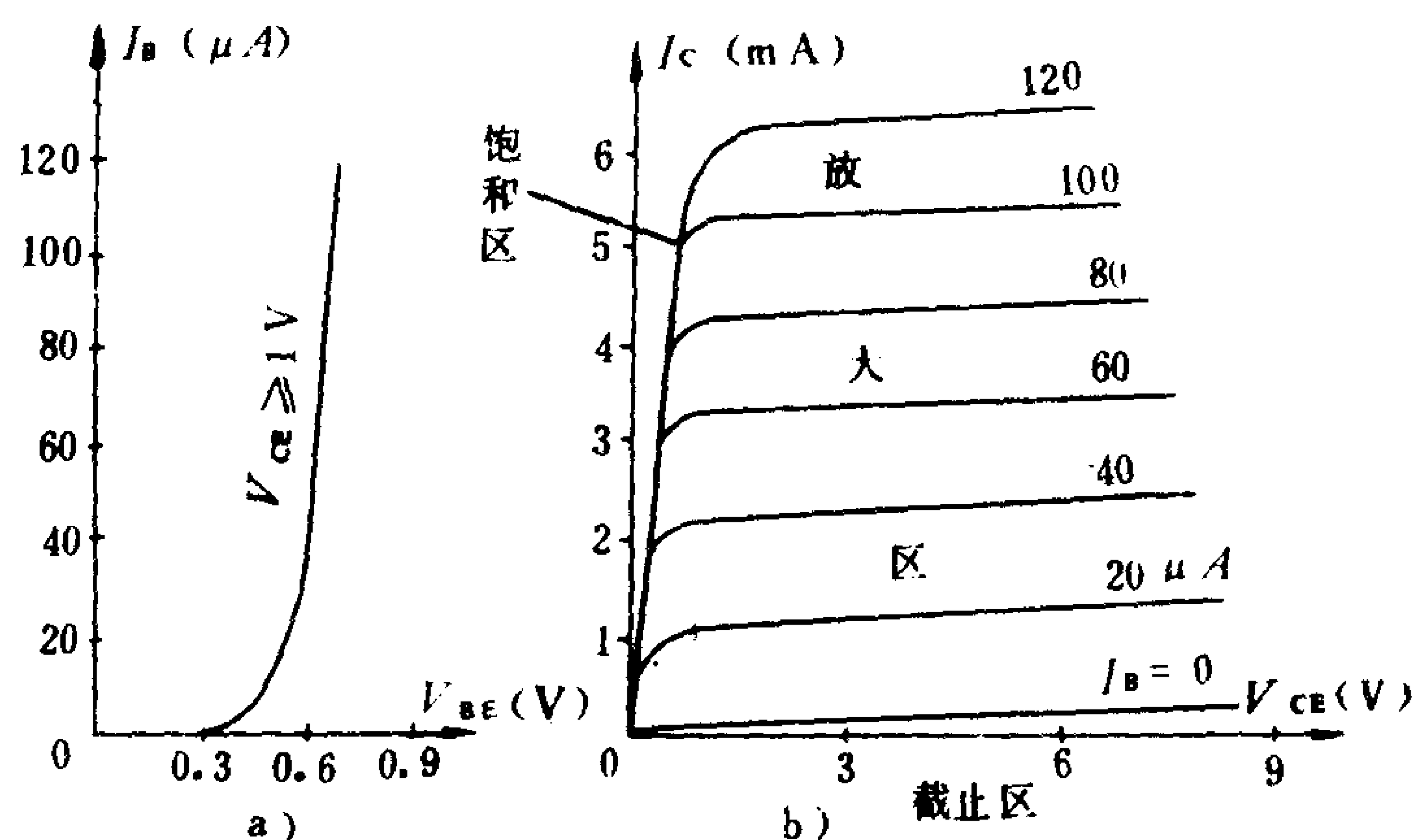


图 1.1.8-9　晶体管的特性曲线
a）输入特性曲线；b）输出特性曲线

输出特性曲线　它是指基极电流I_B一定时，集电极电流I_C与集-射极电压 V_{CE}之间的关系，即$I_C=f(V_{CE})|I_{B=const}$，如图 1.1.8-9 b）所示。$I_B$一定，从发射区扩散到基区的电子数基本不变。在 $V_{CE}>1V$之后，这些电子的绝大部分已被拉入到集电区，形成I_C，以致当 V_{CE}再升高时，I_C将不再有明显的增加，具有恒流特性。I_B增大，I_C也增大，曲线向上移，且I_C的增量ΔI_C比I_B的增量ΔI_B大得多，这就是晶体管的电流放大作用。

输出特性曲线分为三个区域：放大区、截止区和饱和区。放大区中的管子工作于放大状态，发射结正偏，集电结反偏，且$I_C=\bar{\beta}I_B$；$I_B=0$的输出特性曲线以下的区域称为截止区，可靠的截止，要求两个PN结都应处于反偏；当 $V_{CE}<V_{BE}$时，两个PN结都处于正偏，I_C将不再随I_B的增加而增加，称为晶体管的饱和。

1.5.3　晶体管的主要参数

电流放大系数$\bar{\beta}$、β　静态I_C与I_B之比称为静态（直流）电流放大系数$\bar{\beta}$；I_C的变化量ΔI_C与I_B的变化量ΔI_B之比称为动态（交流）电流放大系数β。β值愈大的管子，热稳定性愈差。

集-基极反向饱和电流I_{CBO}　它是由于集电结反偏，集电区和基区少数载流子的漂移运动所形成的电流，受环境温度的影响很大。在常温下，小功率硅管的I_{CBO}约在 1 μA以下，锗管的较大。I_{CBO}愈小的管子，热稳定性愈好。

集-射极穿透电流I_{CEO}　它是指基极开路，集电结反向偏置，发射结正向偏置时的集电极电流。由图 1.1.8-10 可知，$I_{CEO}=(1+\bar{\beta})I_{CBO}$。$I_B\neq 0$时的集电极电流（参阅图 1.1.8-8）$I_C=I_{EC}+I_{CBO}=\bar{\beta}I_{EB}+I_{CBO}=\bar{\beta}(I_B+I_{CBO})+I_{CBO}=\bar{\beta}I_B+(1+\bar{\beta})I_{CBO}=\bar{\beta}I_B+I_{CEO}$。$I_{CBO}$、$\bar{\beta}$越大的管

子，热稳定性越差。

集电极最大允许电流I_{CM}、集-射极穿透电压BV_{CEO}和集电极最大允许耗散功率P_{CM} 它们是管子的三个极限参数，分别是β下降到正常值的2/3的I_C，I_B为零时加于集-射极间的最大允许电压，当管子因受热而引起的参数变化不超过允许值时，集电极所消耗的最大功率。管子工作时，不允同时达到I_{CM}和BV_{CEO}，否则集电极的实际损耗将大大超过P_{CM}而使管子损坏。

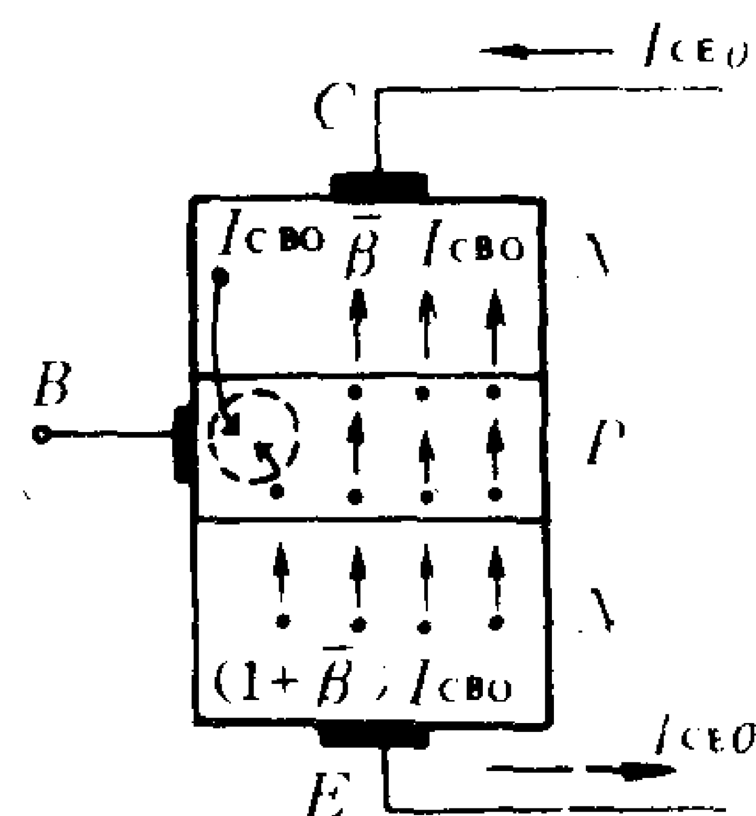


图 1.1.8-10 I_{CEO}的形成

1.6 单极型（场效应）晶体管

场效应晶体管按其结构的不同分为结型和绝缘栅型两类。

1.6.1 结型场效应管

1）结型场管的结构和栅压的控制作用

如图 1.1.8-11 所示，在N型硅片两侧利用扩散方法生成两个PN结，夹在两个PN结中间的N区就是N型导电沟道。短接两个P区的电极称为栅极G，N型硅片上下引出的电极分别称为漏极D和源极S。场效应管的栅极电压控制作用如图 1.1.8-12 所示。漏-源极间加正向电压，栅-源极间加反向电压，两个PN结都为反偏，栅流I_G为零，栅-源极间呈现高达 100 MΩ的输入电阻R_{GS}。栅-源极间反压V_{GS}愈高，耗尽层愈厚，导电沟道愈窄，漏极电流I_D愈小。当V_{GS}足够高时，两边的耗尽层合拢，导电沟道消失，$I_D\approx 0$；称为关断。在V_{DS}一定情况下，关断状态的V_{GS}称为栅-源关断电压V_P。可见，当V_{GS}在0～V_P间变化时，就可以控制I_D的变化。这就是场效应管栅极电位V_G对漏极电流I_D的控制作用。这一控制作用常用I_D的增量ΔI_D与引起这一变化的V_{GS}的增量ΔV_{GS}之比，即$g_m=\frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}\Big|_{V_{ds}=\text{const}}$被称为跨导的量来表征。$g_m$愈大，控制作用愈强。$I_D$只在两个PN结之间的导电沟道中流通，且参与导电的只有一种极性的载流子（N型沟道的为电子，

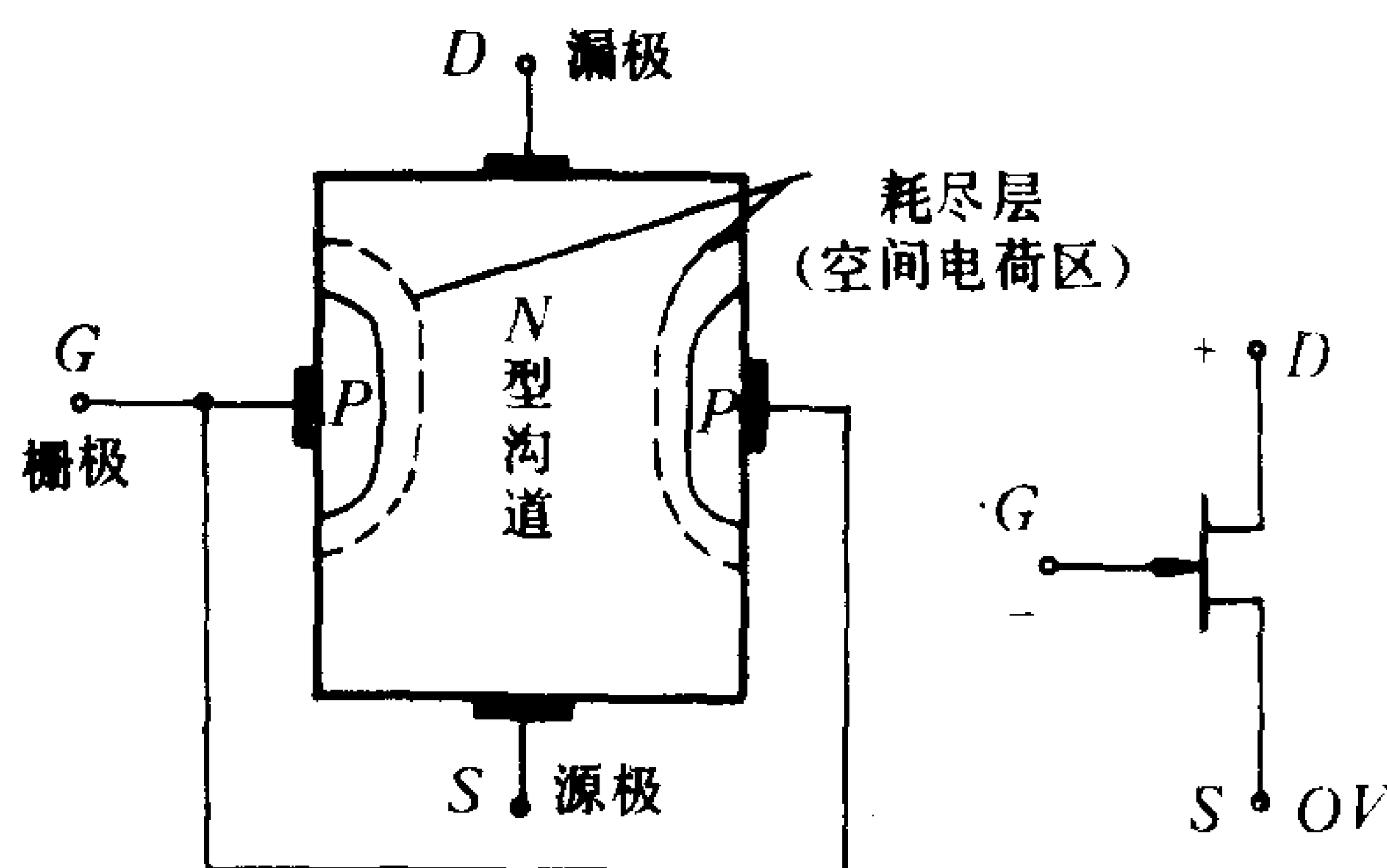


图 1.1.8-11 N沟道结型场效应管的结构和符号

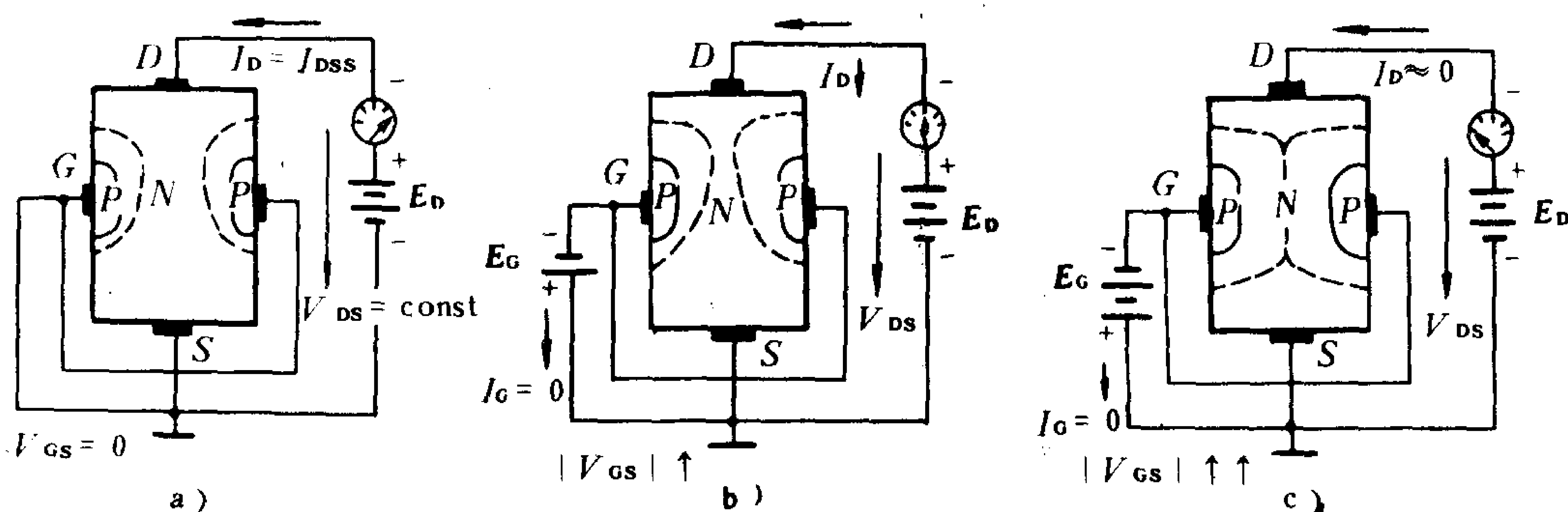


图 1.1.8-12 结型场效应管栅极电压的控制作用

P型沟道的为空穴)，所以场效应管是一种单极型晶体管。

除N沟道结型场效应管外，还有P沟道结型场效应管，其导电机构示意图及其表示符号如图 1.1.8-13 所示，P沟道参与导电的是空穴。它的电压控制作用与N沟道管子的类似，只是各电源的极性与N沟道管子的相反。

2)结型场效应管的特性曲线和主要参数

转移特性　它是指 V_{DS}一定时，I_D与 V_{GS}的关系，即 $I_D=f(V_{GS})|_{V_{ds}=const}$，如图 1.1.8-14 a)所示。此特性可以从漏极特性曲线上取某一V_{DS}值得到。转移特性曲线的斜率就是跨导g_m。

漏极特性　它是指 V_{GS}一定时，I_D与 V_{DS}的关系，即$I_D=f(V_{DS})|_{V_{GS}=onst}$，如图 1.1.8-14 b)所示。在放大电路中，场效应管工作在特性曲线的平坦区域。

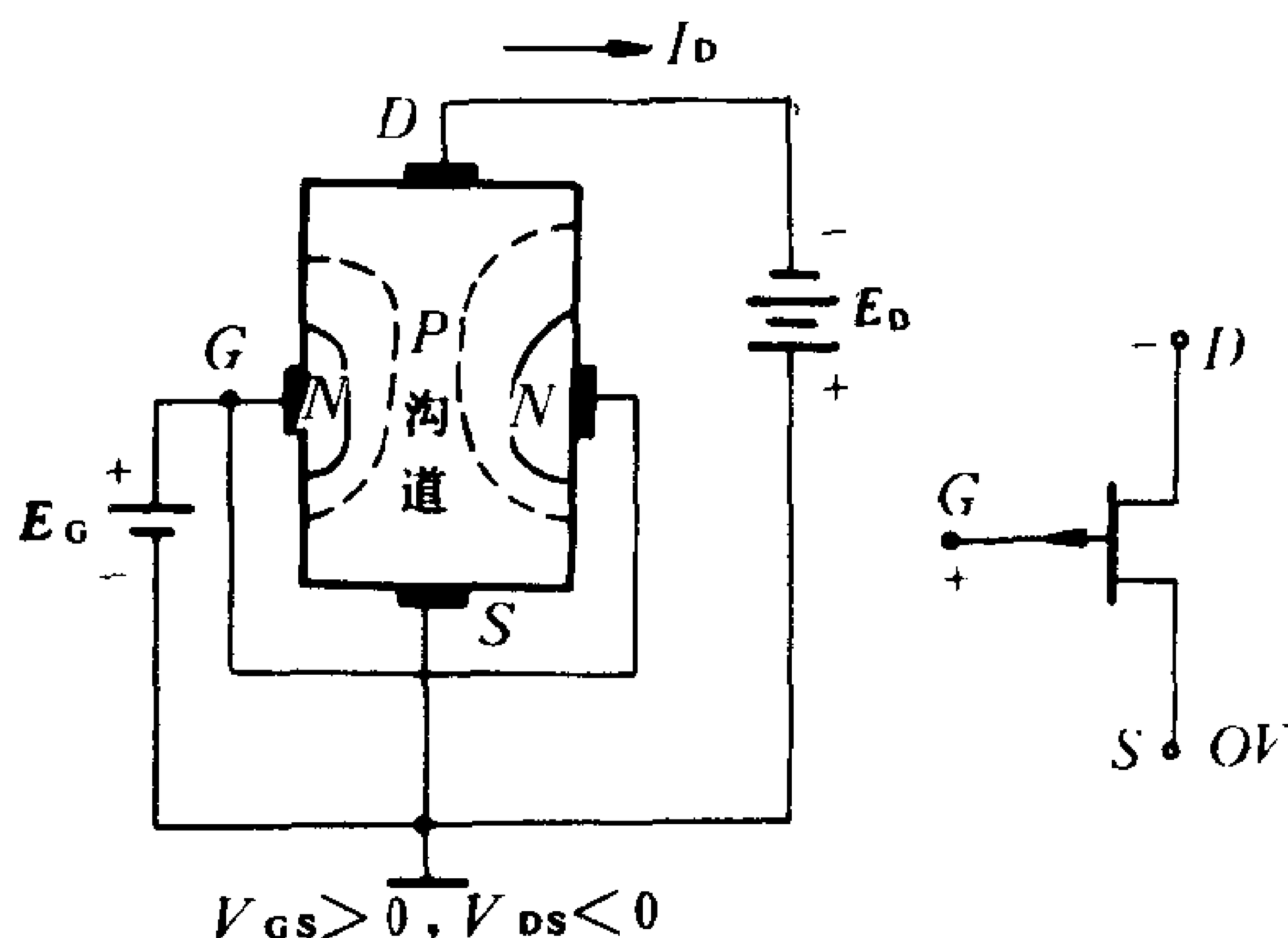


图 1.1.8-13　P沟道结型场效应管的结构和符号

主要参数　关断电压 V_P——为在一定的 V_{DS}下，使 I_D为零的 V_{GS}；饱和漏极电流 I_{DSS}——为 $V_{GS}=0$时的I_D；跨导g_m——转移特

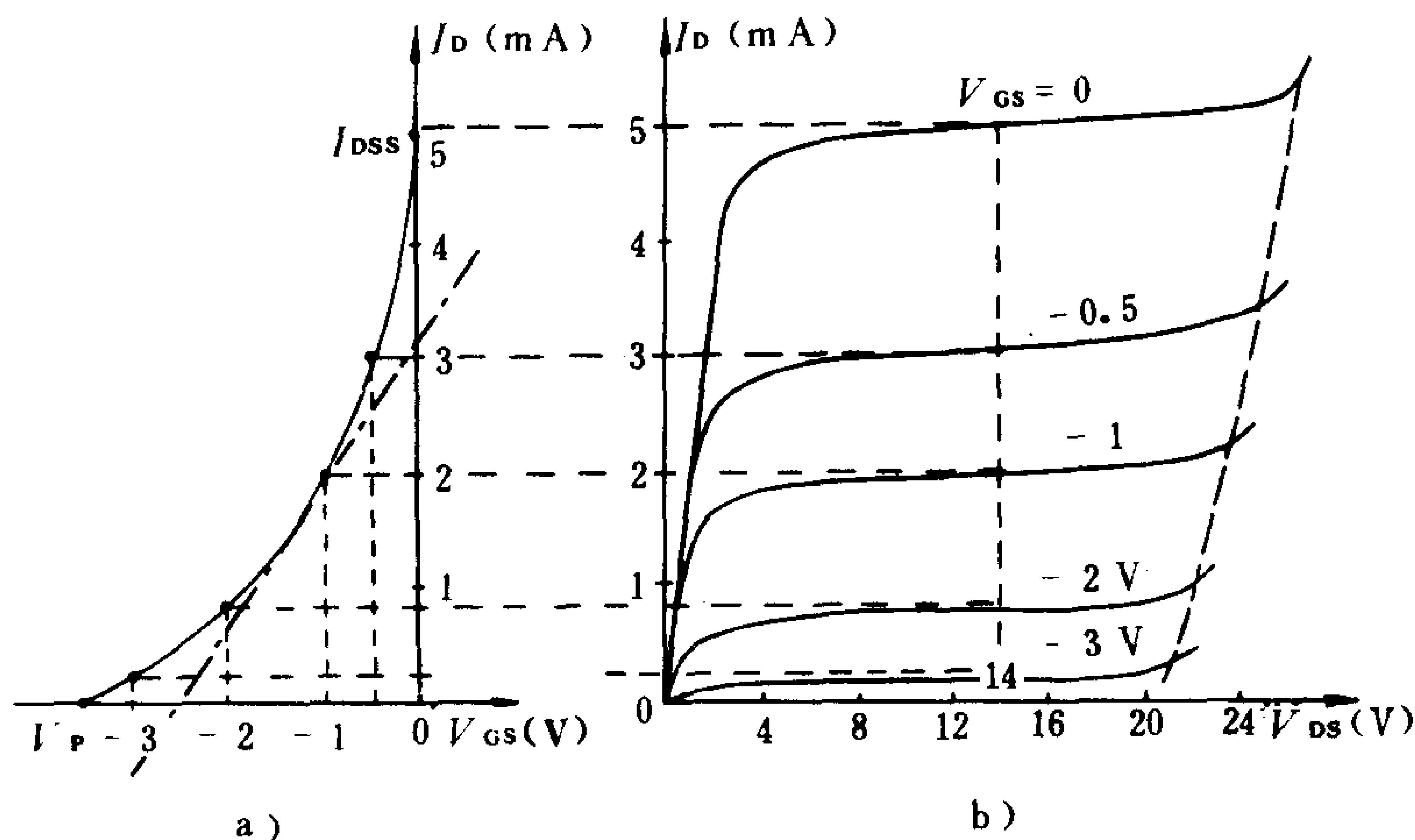


图 1.1.8-14　N沟道结型场效应管的特性

a)转移特性；b)漏极特性

性曲线的斜率；栅-源电阻R_{GS}——因PN结反偏；R_{GS}可达数十兆欧。此外，同双极性晶体管一样，也有三个极限参数：最高漏源电压BV_{DS}、最高栅源电压BV_{GS}和最大耗散功率P_{DM}。

1.6.2　绝缘栅场效应管

这种管子的栅极与源（漏）极是绝缘的，因而有更高（达 $10^{14}\Omega$）的栅源电阻R_{GS}。按其工作状态可分为增强型和耗尽型两类。每类又有N沟道和P沟道之分。

1)N沟道增强型绝缘栅场效应管　图 1.1.8-15 是这类管子的结构示意图。用一块掺杂浓度较低的P型硅片作衬底，其上扩散两个相距很近的高掺杂浓度的N^+区，并在硅片表面生成一层薄薄的SiO_2绝缘层，再在如图示位置安装三个电极：栅极G、源极S和漏极D。把S与衬

底连接起来，在栅源极之间加E_G。栅极与衬底表面相当于电容器的两个极板，在两个N^+区之间出现很多电子。这就是N型导电沟道，且E_G、V_G越高，沟道越宽。当在漏源极之间加E_D(＞E_G)后，由于合成电场的作用，导电沟道中的电子分布如图1.1.8-16。当V_{GS}＜V_T时，绝缘层电场很弱，衬底表面被感应的电子几乎被P型衬底中的空穴复合，形成负离子耗尽层，N沟道仍被关断，$I_D \approx 0$，如图1.1.8-16 a)所

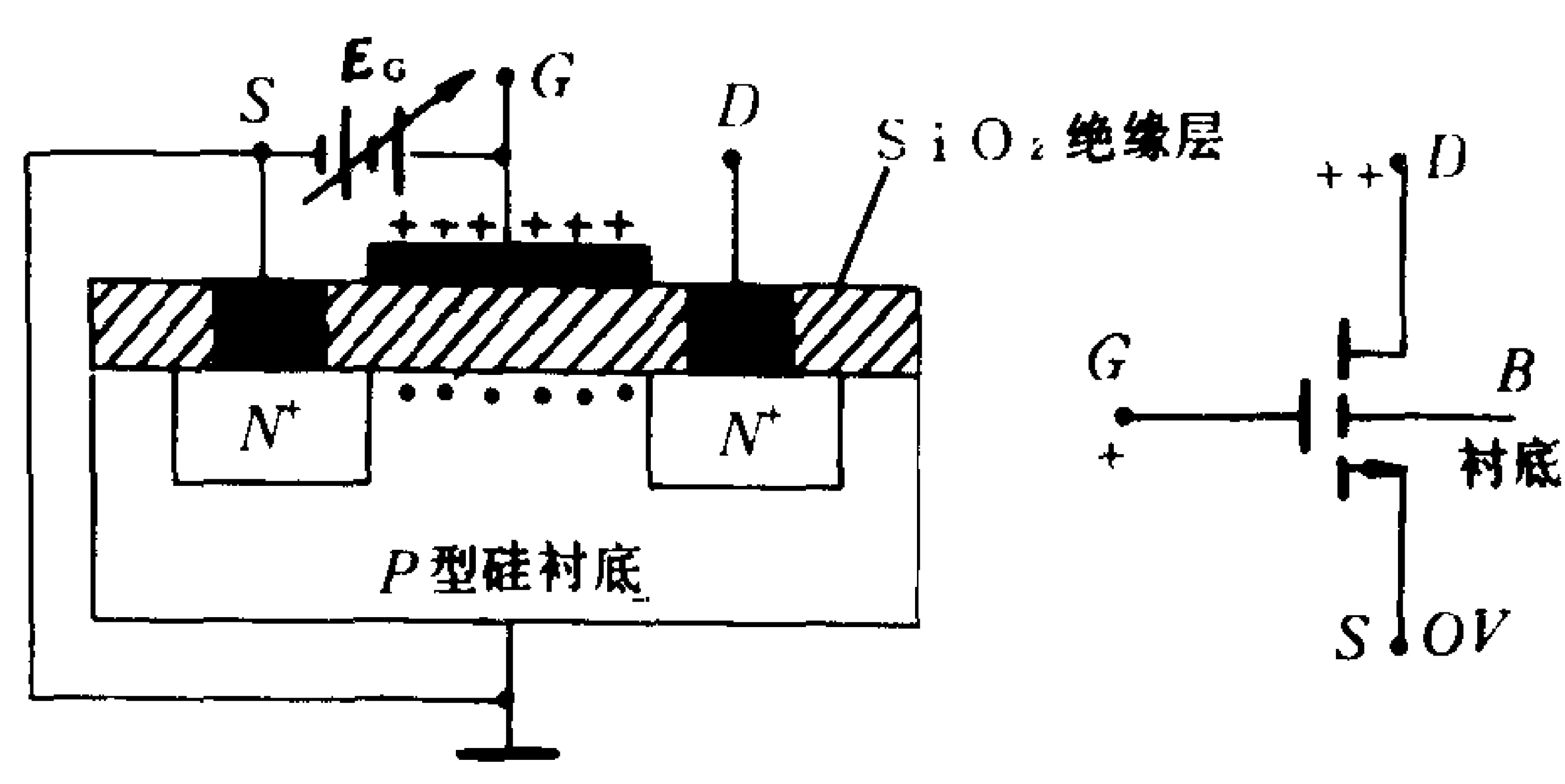


图1.1.8-15　N沟道增强型绝缘栅场效应管的结构和符号

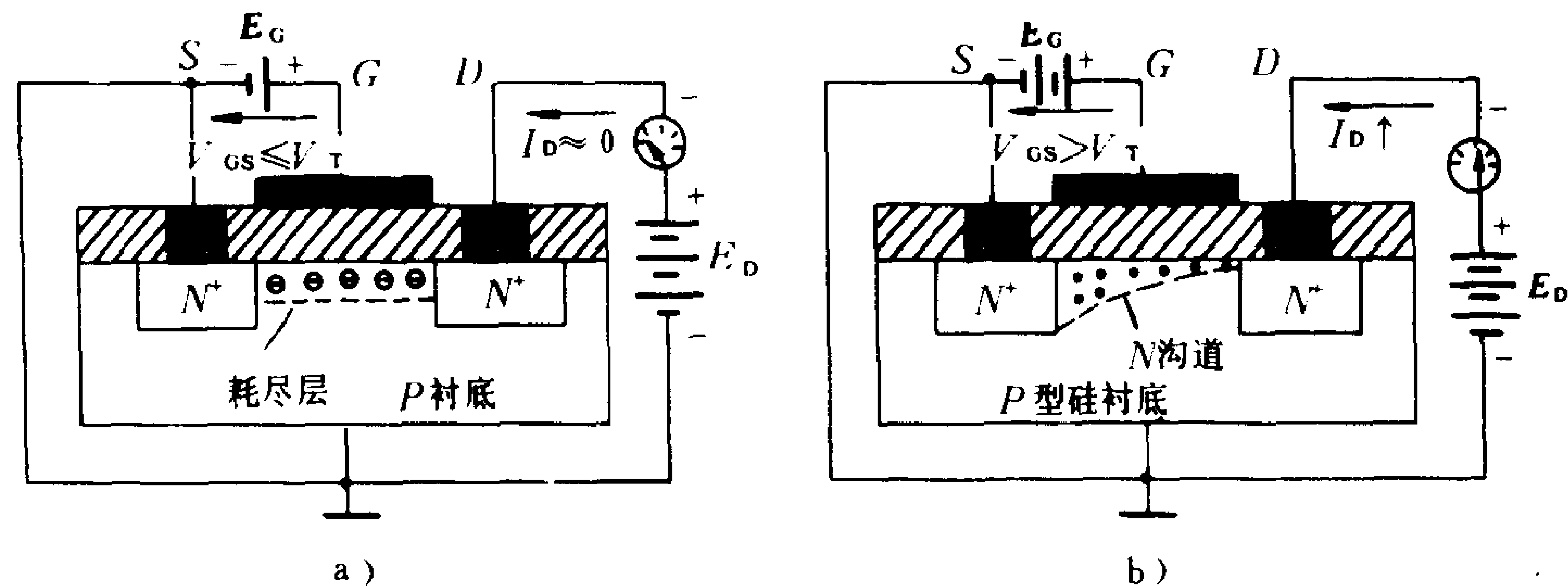


图1.1.8-16　N沟道增强型绝缘栅场效应管的工作原理

a) $V_{GS} < V_T$，$I_D \approx 0$；b) $V_{GS} > V_T$，I_D

示；当V_{GS}＞V_T后，衬底表面被感应的电子数增多，填补空穴后的多余电子就在衬底表面形成N型导电沟道，管子开始导通．且V_{GS}增加，I_D增加，如图1.1.8-16 b)所示。V_T称为管子的开启电压。它是指在一定的V_{DS}下，使管子由不导通变为导通的临界栅源电压。这类管子的特性如图1.1.8-17所示。

P沟道增强型绝缘栅场效应管的结构、电源极性和符号，如图1.1.8-18所示，其工作原理与N沟道的相同。

2) N沟道耗尽型绝缘栅场效应管　图1.1.8-19是这类管子的结构示意图，与N沟道增强型的结构很相似，但其控制特性却有显著的不同。制造时，在SiO_2绝缘层中掺有大量的正离子，在两个N^+区之间感应出很多的负电荷，形成原始N型导电沟道。在V_{DS}为定值的情况下，即使$V_{GS}=0$，漏源之

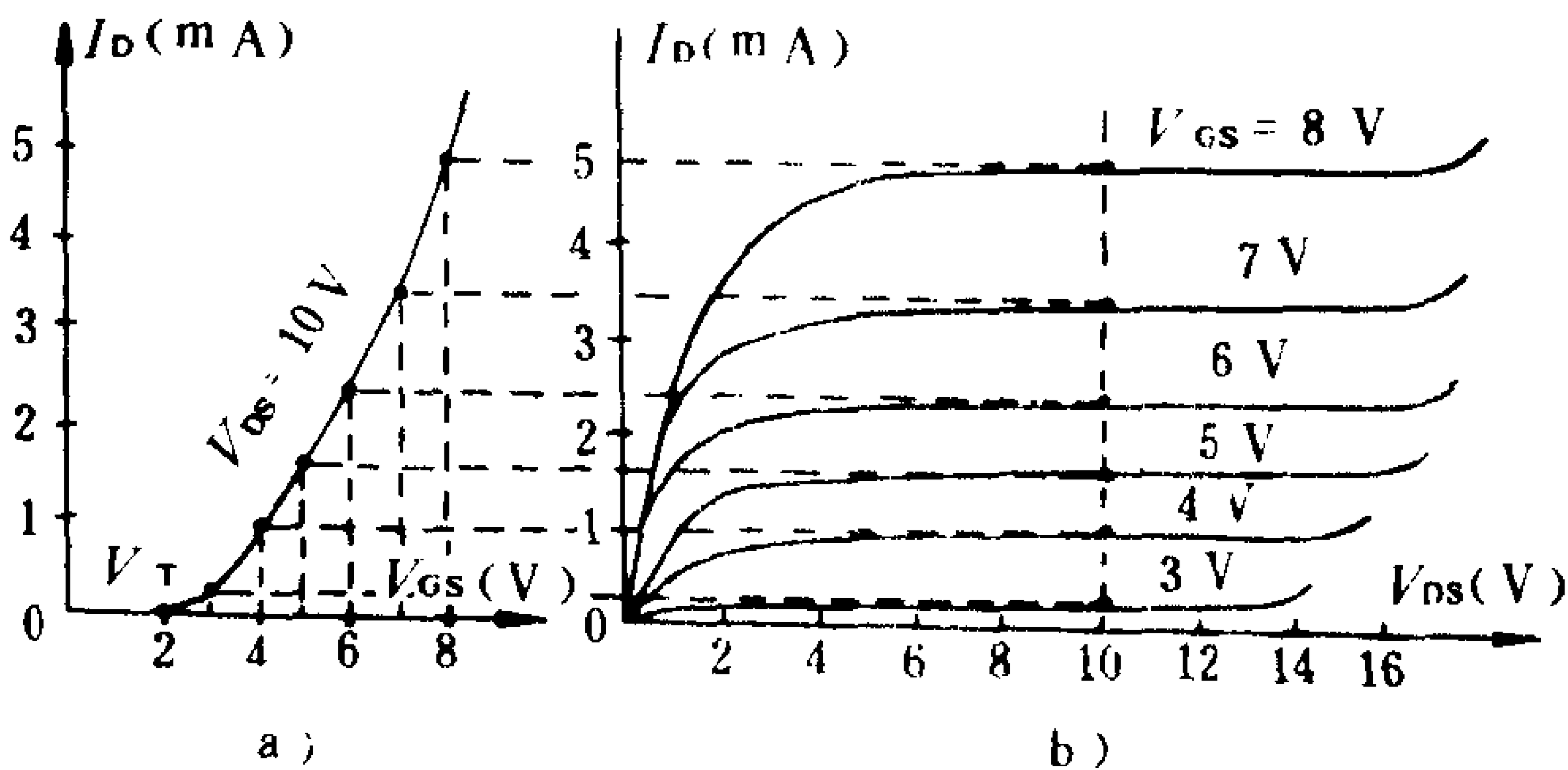


图1.1.8-17　N沟道增强型绝缘栅场效应管的特性

a)转移特性；b)漏极特性

间已经导通，并流过原始导电沟道的饱和漏极电流I_{DSS}。如V_{GS}＞0，在两个N^+区之间感应出更多的负电荷，如图1.1.8-20 a）所示，I_D＞I_{DSS}，且I_D随V_{GS}的增加而增大。如V_{GS}＜0，原始导电沟道中的一部分电子将填补空穴，形成负离子耗尽层，如图1.1.8-20 b）所示，导电

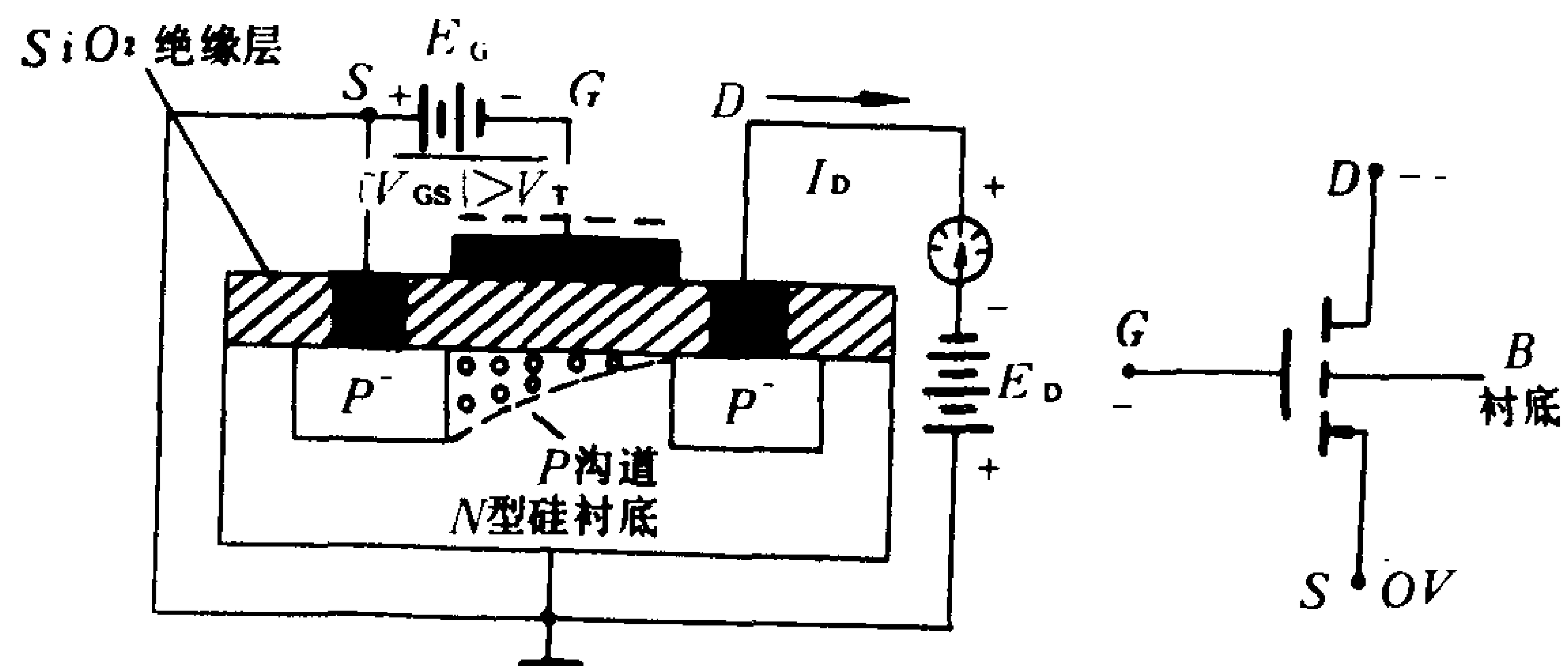


图 1.1.8-18　P沟道增强型绝缘栅场效应管的结构和符号

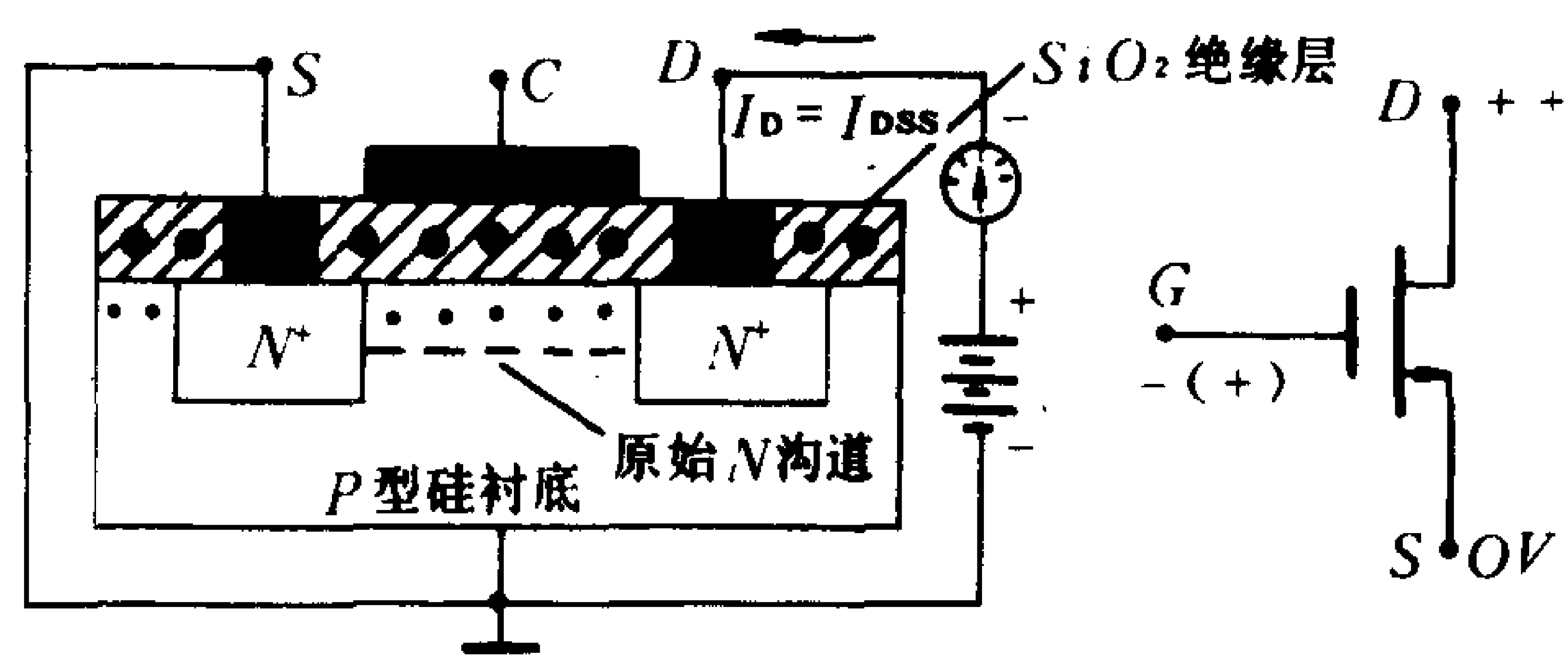


图 1.1.8-19　N沟道耗尽型绝缘栅场效应管的结构和符号

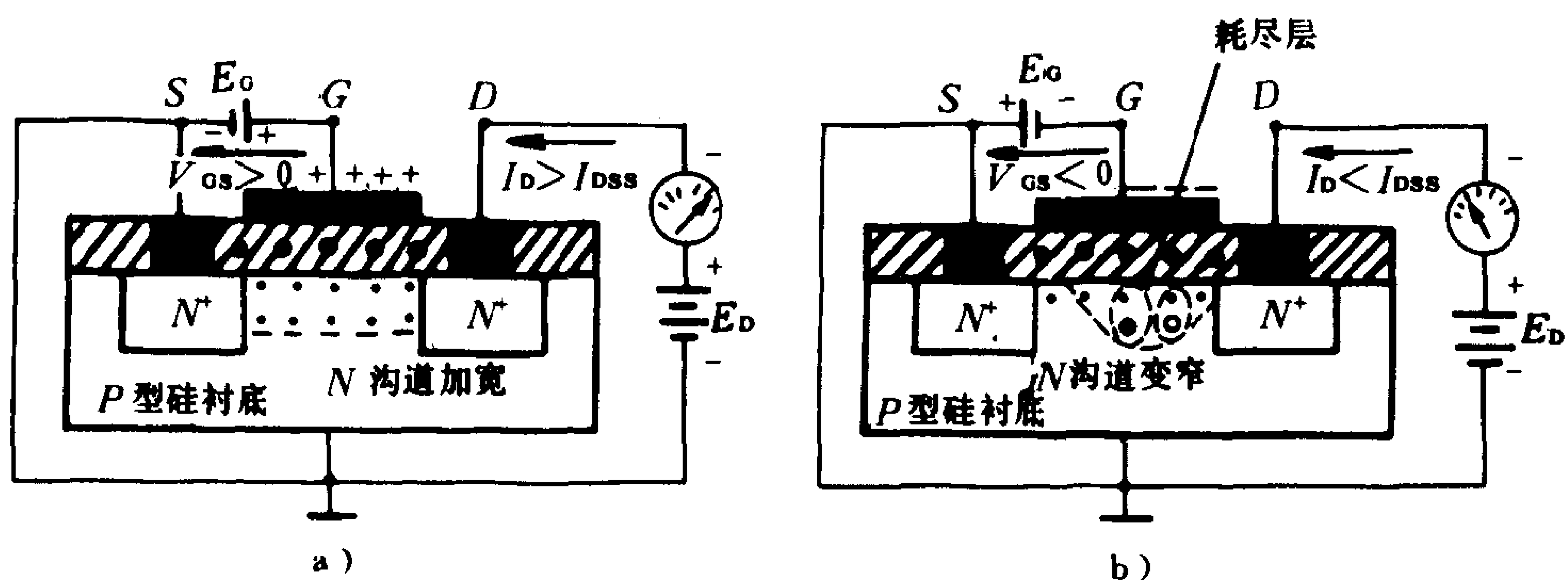


图 1.1.8-20　N沟道耗尽型绝缘栅场效应管的工作原理

a）$V_{GS}>0$，$I_D>I_{DSS}$；b）$V_{GS}<0$，$I_D<I_{DSS}$

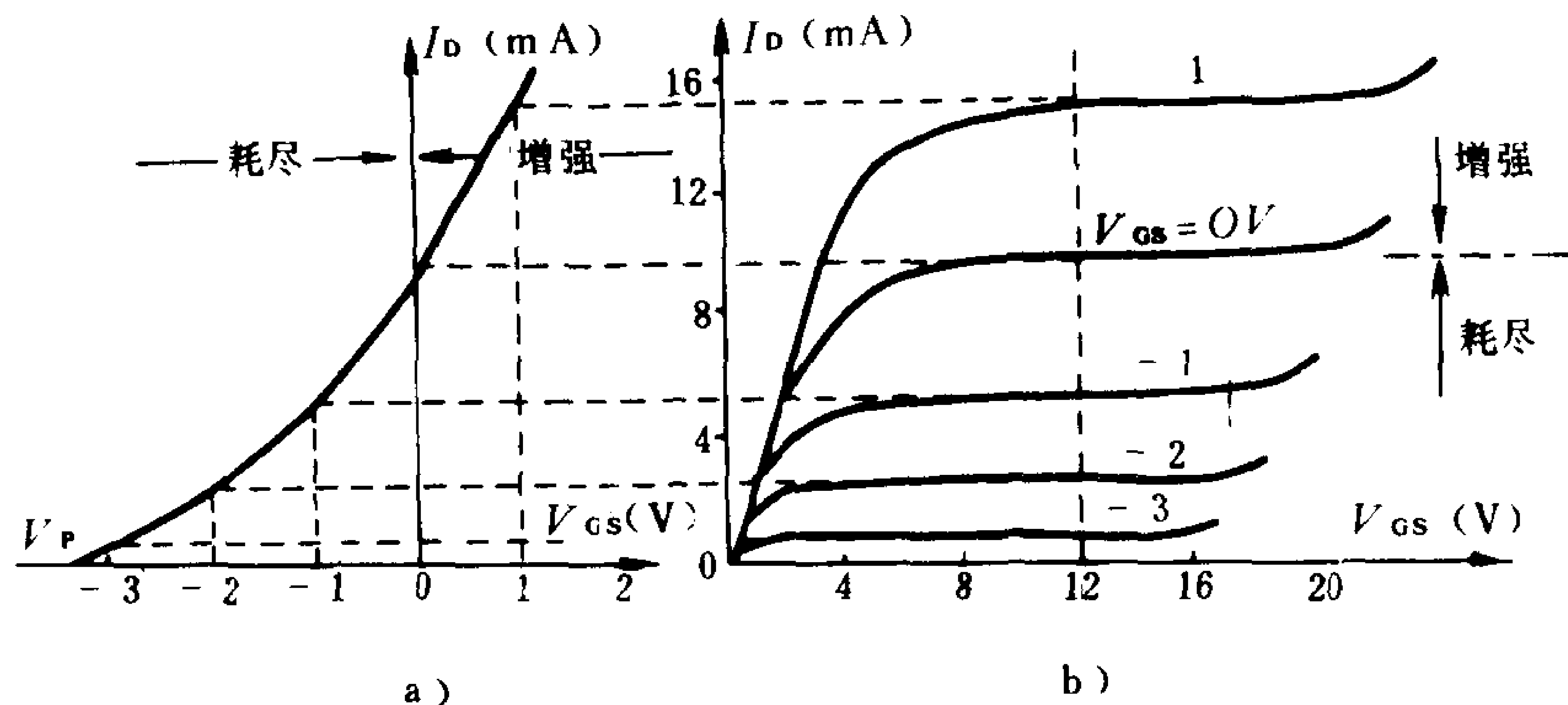


图 1.1.8-21 N沟道耗尽型绝缘栅场效应管的特性

a)转移特性；b)漏极特性

沟道变窄，I_D减小；V_{GS}愈负，导电沟道愈窄，I_D愈小。当$|V_{GS}|$增加到关断电压V_P时，导电沟道被关断，$I_D\approx 0$。这类管子的特性如图 1.1.8-21，栅极电位V_G在正和负的较大范围内变化都可以控制漏极电流I_D。但这类管子通常仍工作在负栅压状态。

P沟道耗尽型绝缘栅场效应管的结构示意图与图 1.1.8-18 相类似，只是在SiO_2绝缘层中掺有大量的负离子，在两个P^-区之间感应出很多的正电荷（空穴），形成原始P型导电沟道。另外，栅压也常偏置于正值的耗尽层状态。

绝缘栅场效应管的主要参数，其定义与结型场效应管的相同。

2 低频放大器

两种晶体管的主要用途之一是组成放大电路。放大器通常由电压放大和功率放大两部分组成。先由电压放大电路将微信号加以放大去推动功率放大电路，再由功率放大电路输出足够大的功率去推动执行元件。信号频率在 20～20,000 Hz范围内的放大器属于低频放大器。

2.1 放大电路的组成和静态值的计算

2.1.1 放大电路的组成

图 1.1.8-22 是共发射极接法晶体管基本放大电路。图中晶体管T是电流放大元件，R_B是偏流电阻，R_C是集电极负载电阻，E_C是直流电源，它通过R_B、R_C、T，除为放大电路设置合适的静态值外，还为放大电路提供能源。C_1、C_2是隔直耦合电容器。

2.1.2 放大电路静态值的计算

输入信号V_i为零的状态称为放大电路的静态。静态值I_B、I_C、V_{CE}完全由E_C、R_B、R_C和T确定。$I_B=\dfrac{E_C-V_{BE}}{R_B}\approx E_C/R_B$，$I_C=\bar{\beta}I_B$，$V_{CE}=E_C-I_CR_C$。在$E_C$固定的情况下，$R_B$减小，$I_B$增大，$I_C$增大，$V_{CE}$下降，当$I_B$、$I_C$增加到使$V_{CE}\approx 0$，即$I_C\approx E_C/R_C=I_{CS}$时，管子已进入饱和区，$I_C$不再随$I_B$的增加而增加，管子也就失去放大作用。

2.1.3 电压放大原理

输入信号v_i不为零的状态称为放大电路的动态。设v_i是正弦的，基极电流中除静态分量I_B

外，又叠加一动态正弦分量$i_b=I_{bm}\sin\omega t$，由于T的电流放大作用，集极电流中也叠加着被放大后的正弦分量$i_c=\beta i_b$。i_c在R_C上的电压降i_cR_C就是v_i被放大后的输出信号v_0。R_C的作用就是把经管子放大后的i_c转换为v_0，而且在一定范围内适当增大R_C的阻值，可以使v_0的幅度增加。

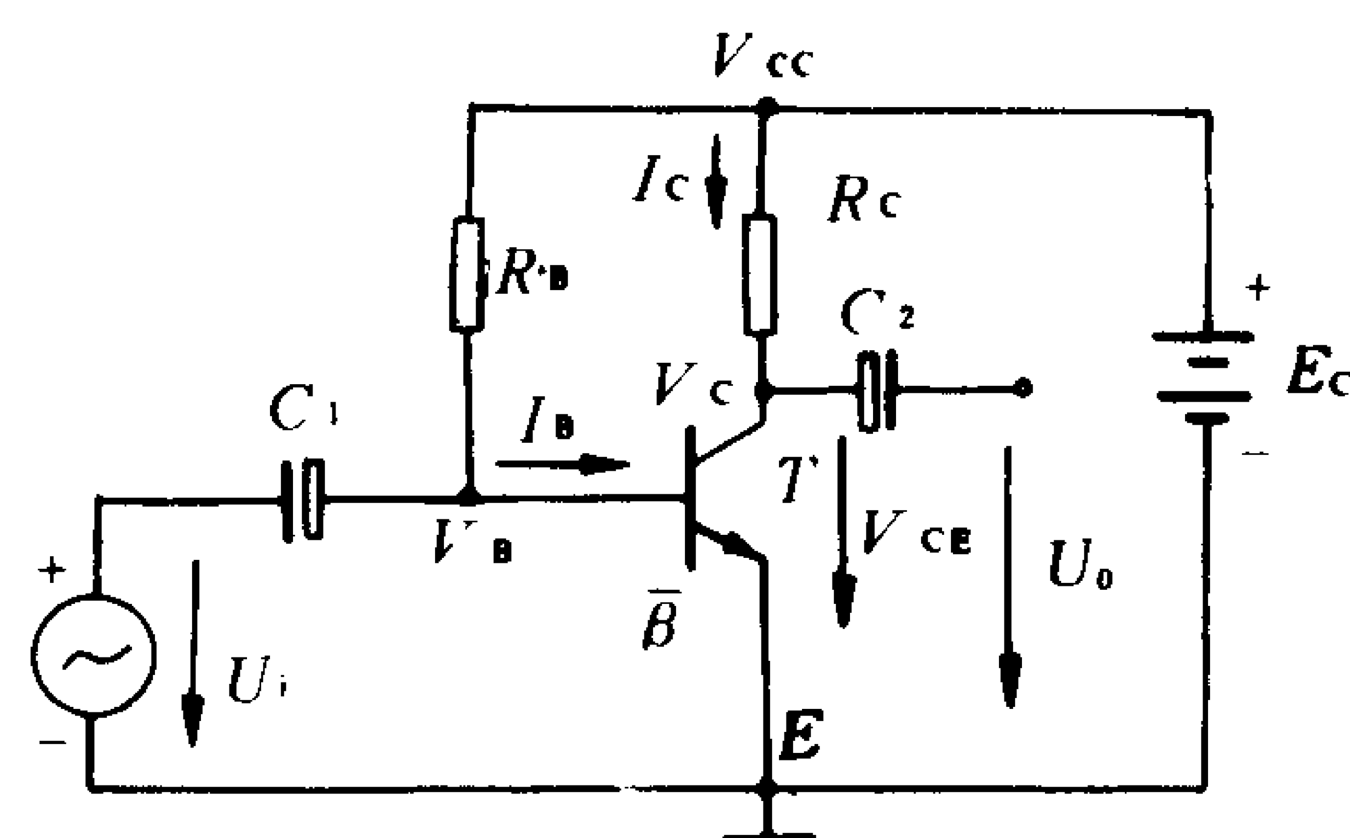


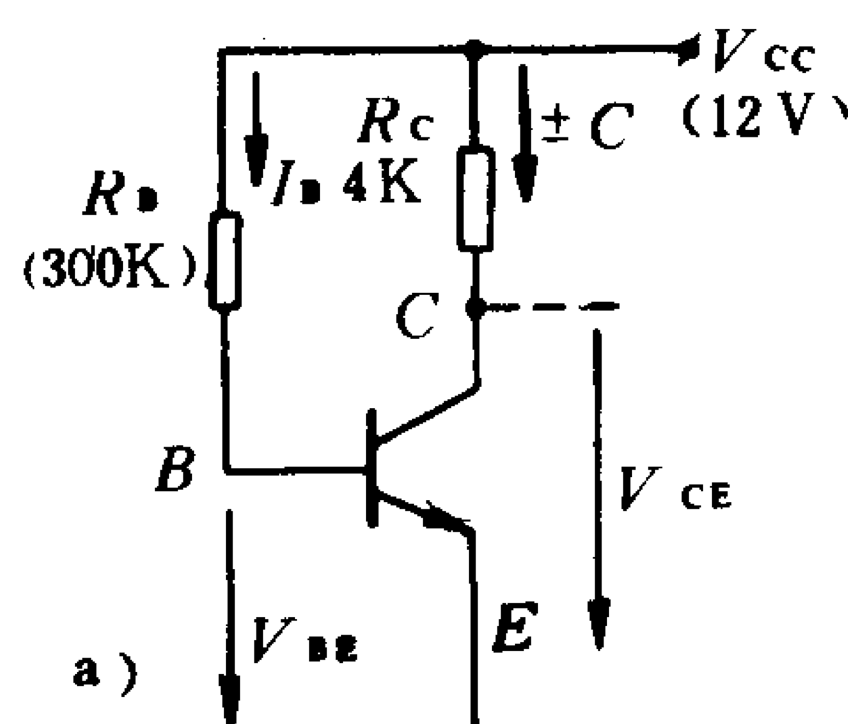
图 1.1.8-22 基本放大电路

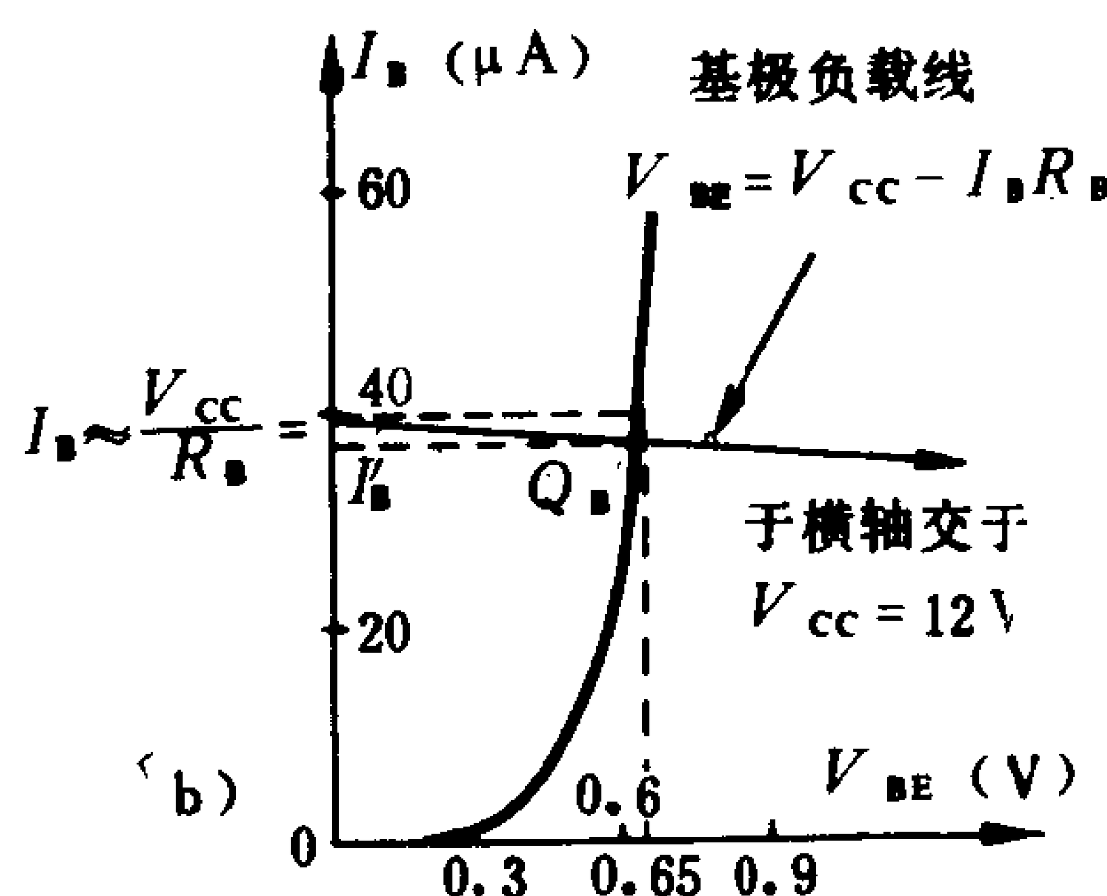
2.2 放大电路的图解法

图解法是利用管子的特性曲线，用作图的方法分析放大电路静态和动态工作情况的一种方法。它不仅可以用来确定放大电路的静态值I_B、I_C和V_{CE}，而且还可以确定其动态工作范围，寻求减小信号失真的办法，分析其电压增益。

2.2.1 确定静态工作点

如果已知管子的$\bar{\beta}$，可用 2.1.2 近似计算法确定其静态值。当$\bar{\beta}$不知而有输入、输出特性曲线时，可用作图法确定其静态值。静态值既然是输入信号为零时的直流分量，就可以应用如图 1.1.8-23 a）所示的直流通道进行。方法是：（1）在输入特性曲线上作基极负载线$V_{BE}=V_{CC}-I_BR_B$，与输入特性曲线交于Q_B点，Q_B点所对应的坐标即为基极静态值$I_B(=40\mu A)$、$V_{BE}(=0.65V)$，如图 1.1.8-23 b）所示；（2）在输出特性曲线上作集极负载线$V_{CE}=V_{CC}-I_CR_C$，与$I_B\approx V_{CC}/R_B(=40\mu A)$的输出特性曲线交于$Q_C$点，$Q_C$点所对应的坐标即为集极静态值$I_C$（$=1.5$ mA）、$V_{CE}(=6$ V)，如图 1.1.8-23 c）所示。R_B的阻值愈小，$I_B\approx V_{CC}/R_B$愈大，Q点的位置愈高，I_C愈大，V_{CE}愈低。





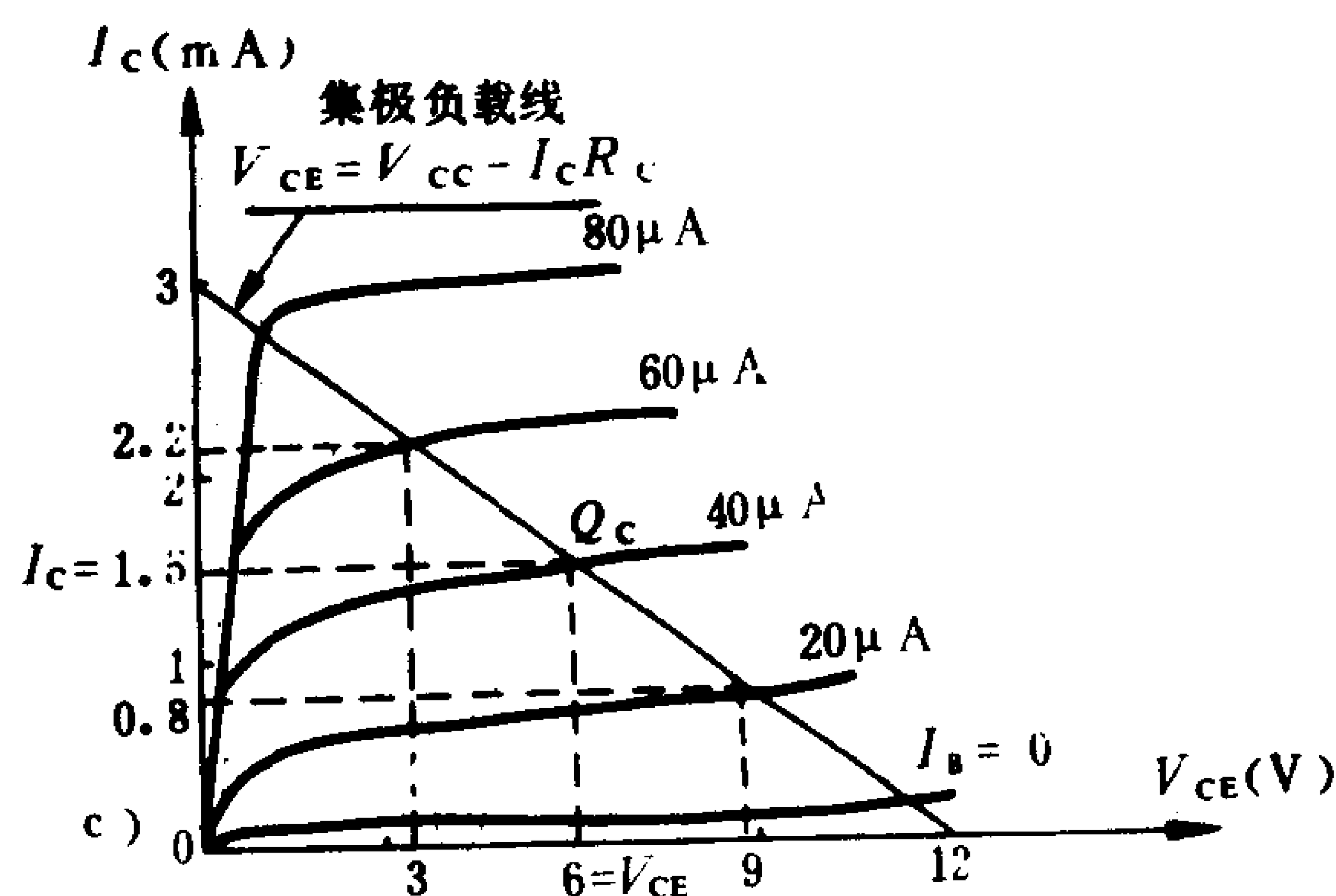


图 1.1.8-23 放大电路静态值的图解法

a）直流通道；b）基极静态值（I_B、V_{BE}）；c）集极静态值（I_C、V_{CE}）

2.2.2 动态分析

在上述静态值(40μA、0.65V；1.5 mA、6 V)的基础上，设输入信号为$v_i=0.02\sin\omega t$(V)的正弦电压，并产生$i_b=20\sin\omega t(\mu A)$的正弦电流流向基极。它们与基极静态值(40$\mu$A、0.65

V)叠加后分别为$i_B=40+20\sin\omega t(\mu A)$，$v_{BE}=0.65+0.02\sin\omega t(V)$。$i_B$经管子放大后，由图1.1.8-24看出，$i_C$、$v_{CE}$都是随时间脉动的变化量，即在集极静态值（1.5mA、6V）基础上也分别叠加了一正弦分量，使得$i_C=1.5+0.75\sin\omega t(mA)$，$v_{CE}=6-3\sin\omega t=6+3\sin(\omega t+\pi)(V)$。既然上述电流、电压都含有直流分量和正弦分量，而且直流分量是由图1.1.8-23 a）直流通道产生的，根据线性电路的可叠加性，正弦分量就可以看成是将电压源V_{CC}短接后构成的交流通道（图1.1.8-25），由输入信号$v_i=(0.02\sin\omega t)$引起的。既然v_i是正弦的，设放大电路是线性的，则交流分量i_b、i_c、v_{ce}也是正弦的，忽略C_1、C_2容抗后，图1.1.8-25 a）所示的交流通道用相量表示为图b)，根据设定的正方向，输出信号的振幅（相量）$\dot{V}_{om}=\dot{V}_{cem}=-\dot{I}_{cm}R_c=-0.75\times4=-3=3\underline{/\pi}(V)$，而输入信号的振幅$\dot{V}_{im}=0.02\underline{/0^\circ}(V)$，则

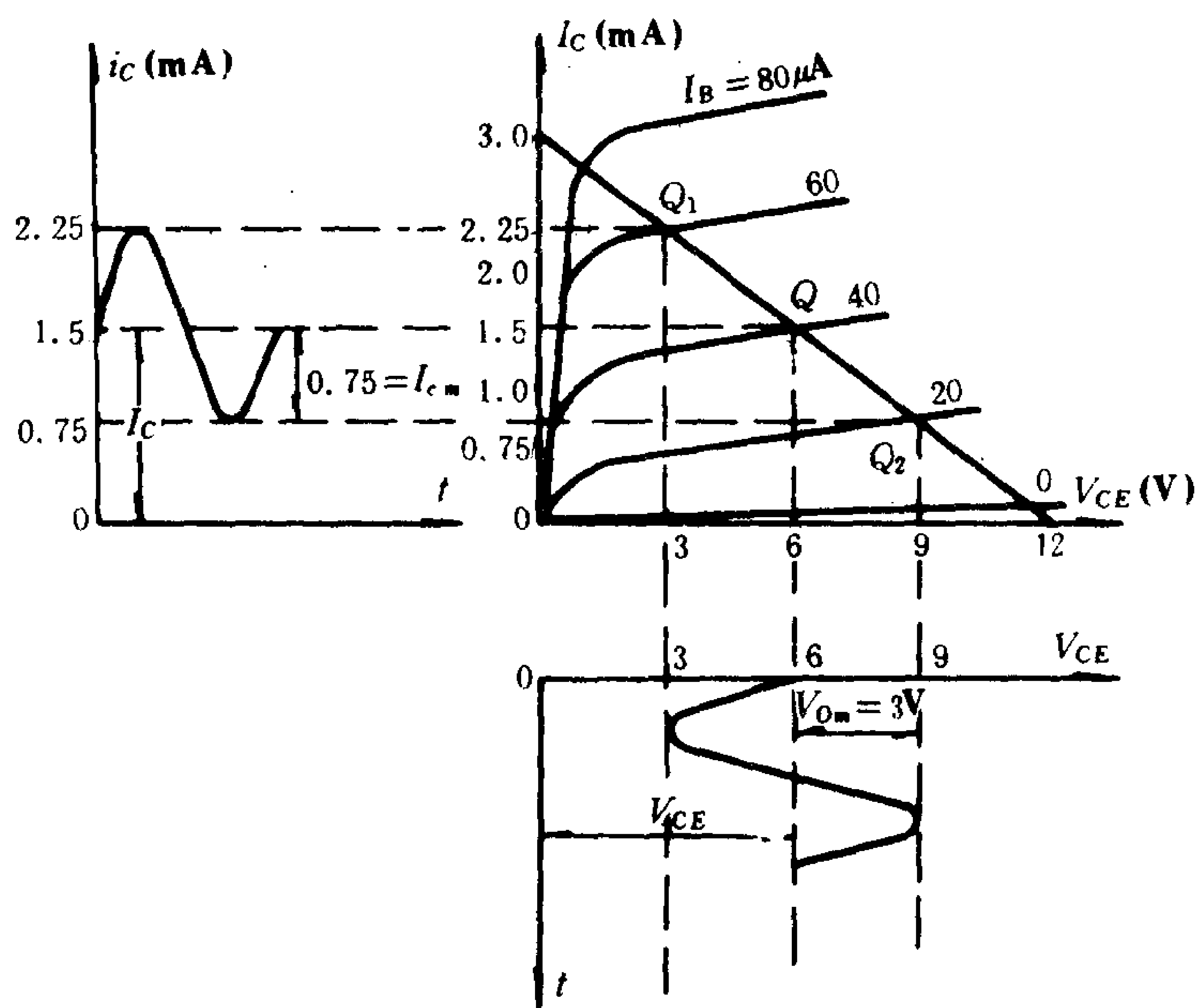


图 1.1.8-24　放大电路动态图解法

放大电路的电压增益(复数)$\dot{A}_{vo}=\frac{\dot{V}_{om}}{\dot{V}_{im}}=150\underline{/\pi}$，表示放大了150倍，且$v_o$与$v_i$相位相差180°。

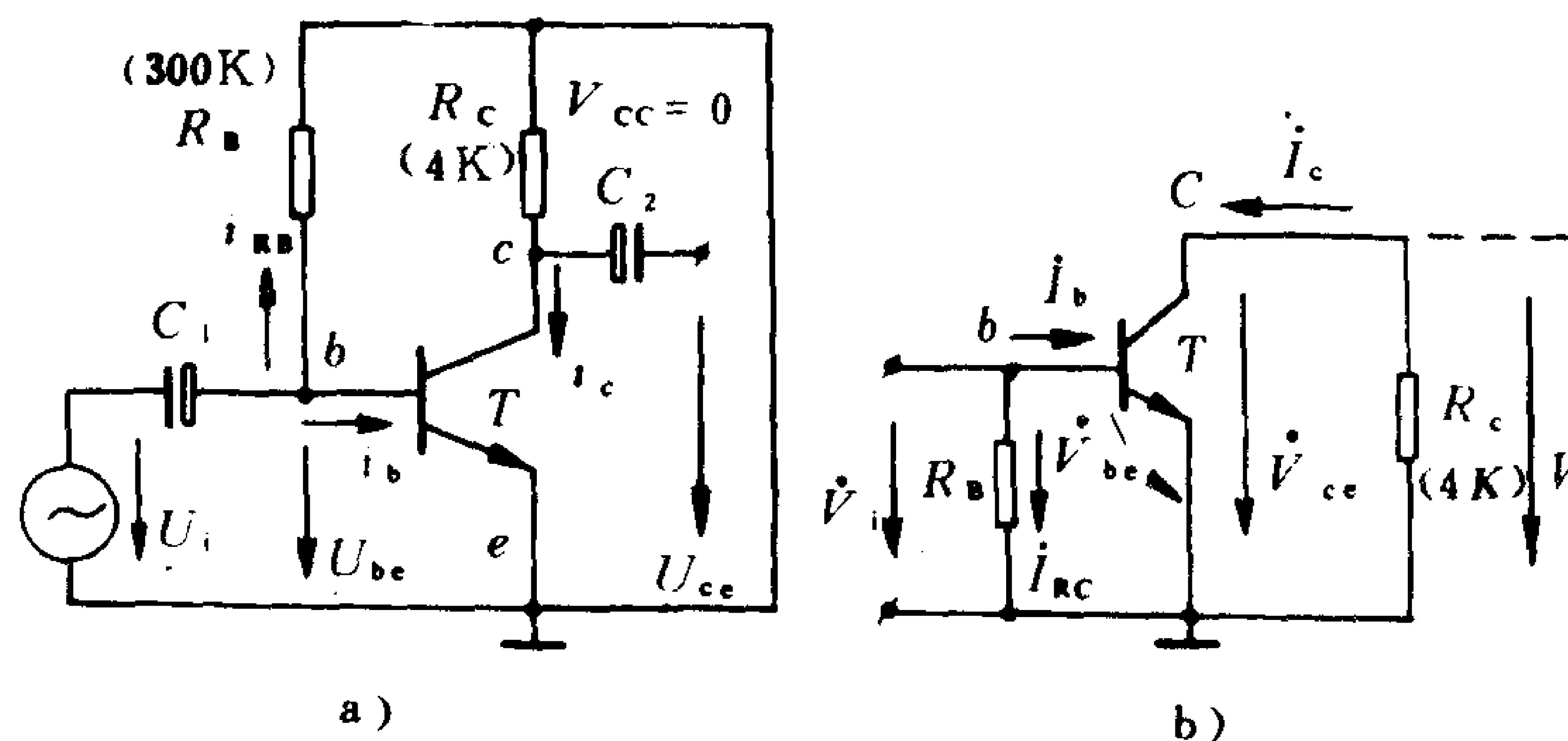


图 1.1.8-25　放大电路的交流通道

a)瞬时值表示；b)相量表示

放大电路输出端总是要接负载的：对于前置放大电路，负载就是后一级的输入电阻；对于末级功率放大电路，负载就是执行元件，如控制电动机的控制绕组，扬声器的音圈等。这些负载一般都可用一个等效负载电阻R_L来表示，如图1.1.8-26 a)所示。b)是它的交流通道，其等效电阻$Rl=\frac{R_CR_L}{R_C+R_L}(=2k\Omega)$。放大器输出端接负载后，管子集极负载不再是$R_C$，而是$Rl=R_C/\!/R_L$。但由于$C_2$的隔直作用，接入$R_L$后对放大器的静态值并无影响，而对动态则应

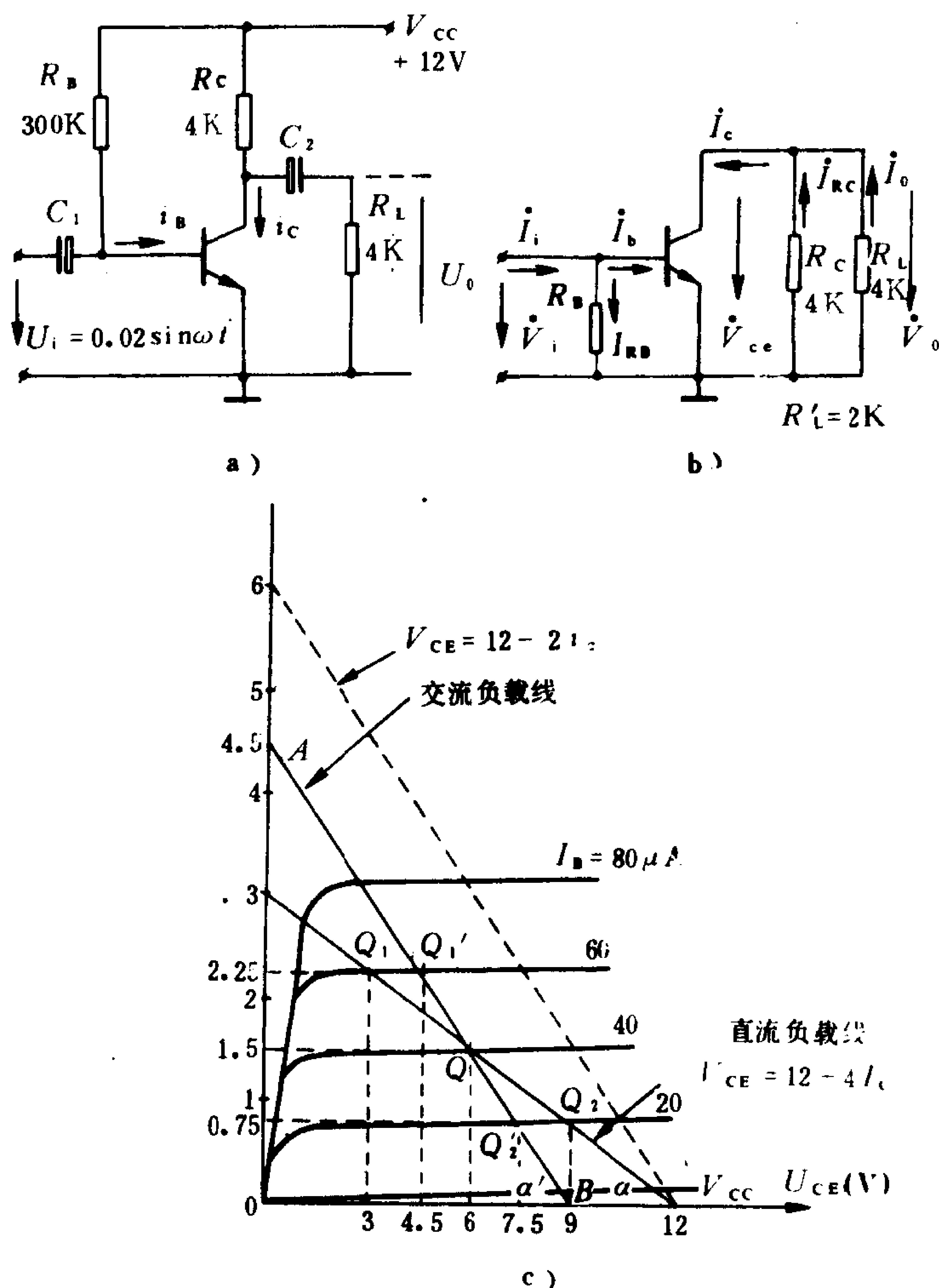


图 1.1.8-26 放大器的有载情况

a）接R_L的基本放大电路；b）交流通道；c）交、直流负载线

以R'_L代替R_C，并作出与R'_L阻值相对应的交流负载线。它就是由虚构负载线$v_{CE}=V_{CC}-i_CR'_L(=12-2i_C)$平移到静态工作点$Q$的直线$AB$，如图 1.1.8-26 c）所示。在相同输入信号$v_i=0.02\sin\omega t$(V)作用下，放大器接负载R_L后，V_0的幅值将从不接R_L时的3V下降为1.5V，即电压增益从空载时的150降为1.5/0.02=75。且R_L阻值愈小，交流负载线愈陡，电压增益也就下降得愈多。

2.2.3 非线性失真

所谓失真是指输出信号的波形相对于输入信号的波形发生了畸变。由于静态值不合适，或输入信号的幅度太大，使放大器的工作范围超出了晶体管特性曲线的线性范围而引起输出信号的波形失真，称为非线性失真。

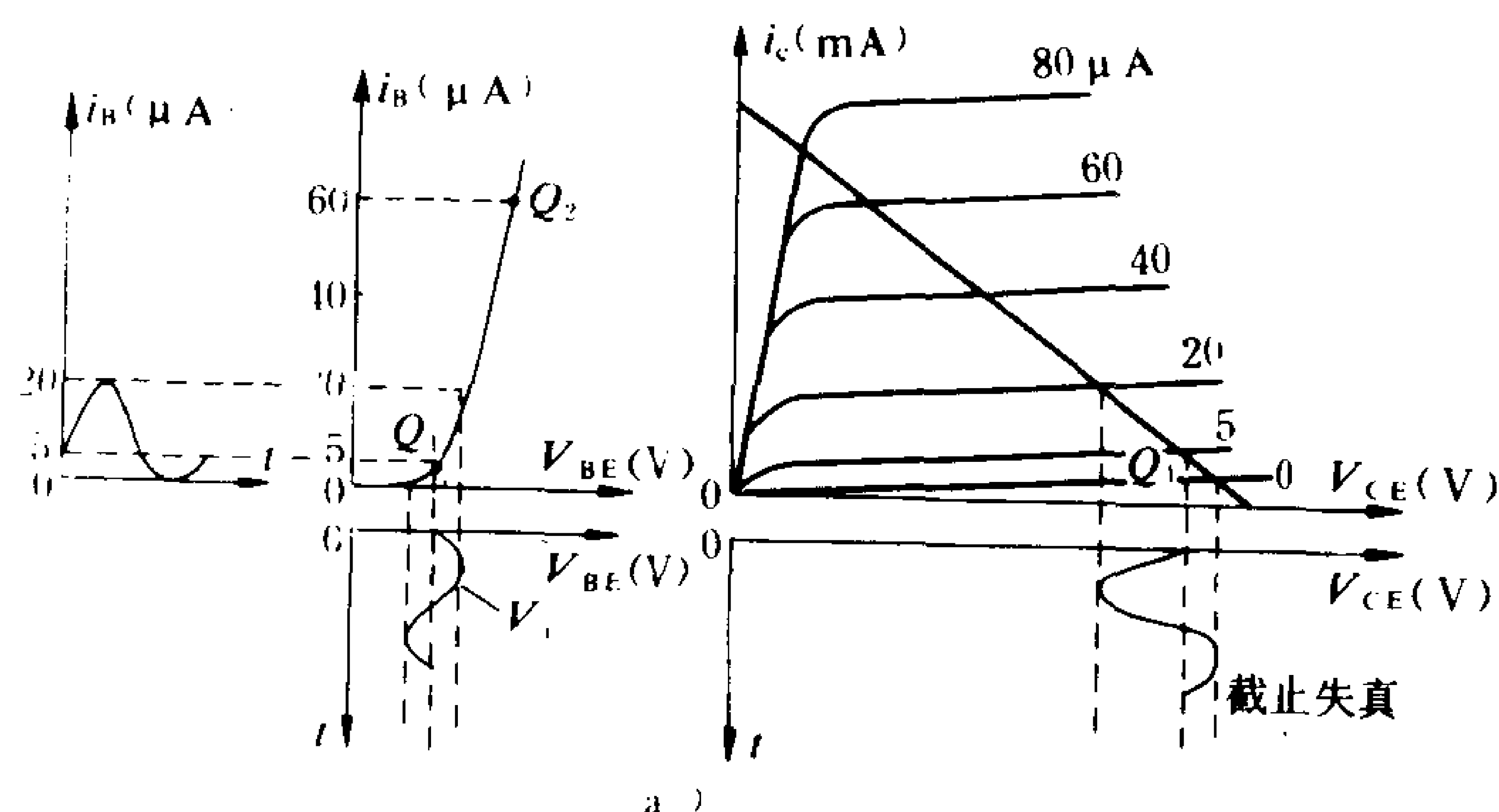
在图 1.1.8-27 a）中，静态$I_B=5\mu A$，即工作点Q_1太低，即使输入信号是正弦的，但在负半周，晶体管进入截止区工作，i_B、v_{CE}和i_C（图中未画出）都严重失真。这是由管子截止引起的，称为截止失真。图b）中，$I_B=60\mu A$，工作点Q_2太高，在v_i的正半周，管子进入饱和区工作，i_B虽不失真，但v_{CE}和i_C（图中未画出）都严重失真。这是由管子饱和引起的，称为饱和失真。要想使放大电路不发生非线性失真，必须要有一个合适的静态工作点，一般取在交流负载线的中点为宜。工作点位置的高低可通过改变R_B的阻值来改变。此外，即使工作点位置合适，但输入信号幅度过大，也是引起非线性失真的原因。

2.3 静态工作点的稳定

合适的静态工作点，并使之保持稳定，是保证放大器有良好放大效果的前提。引起工作点变动的原因除元件老化，电源电压波动外，更突出的是环境温度的变化。

2.3.1 温度对静态工作点的影响

温度的变化将影响到晶体管的I_{CBO}、$\bar{\beta}$和V_{BE}，而使工作点变动。I_{CBO}与温度的关系接近指数函数规律，温度每升高 10°C，I_{CBO}约增加一倍；V_{BE}、$\bar{\beta}$与温度的关系接近线性规律，温度每升高 1°C，V_{BE}约下降2mV；$\bar{\beta}$约增加(0.5～1)%。在固定偏置电路（图 1.1.8-26 a）中，



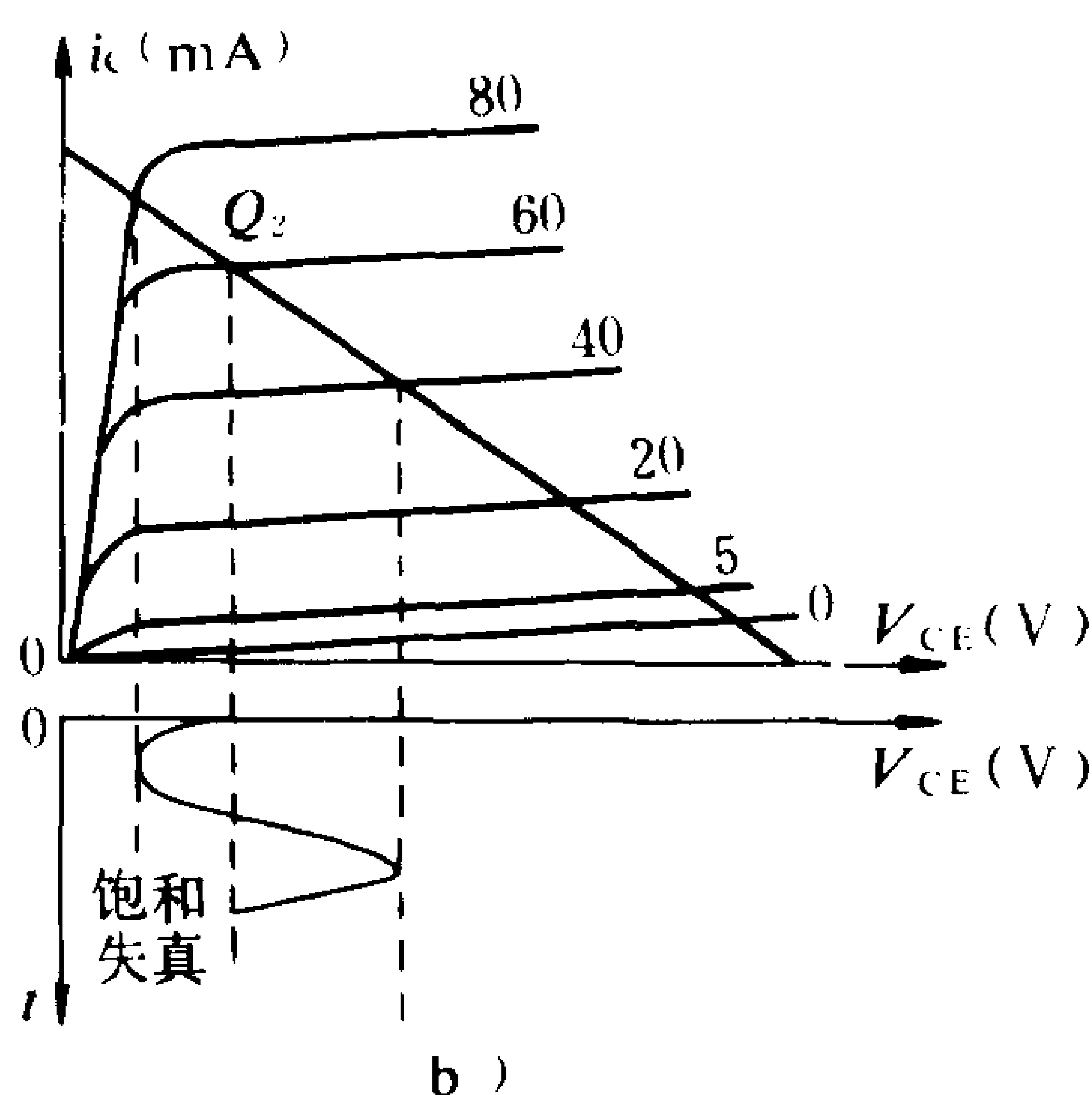


图 1.1.8-27 静态工作点不当引起的非线性失真

a)工作点太低产生截止失真；b)工作点太高产生饱和失真

静态值$I_B=\frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_B}$，$I_C=\bar{\beta}I_B+(1+\bar{\beta})I_{CBO}$，将随温度的升高而升高，尤其$I_C$更为明显。这将有可能使管子进入饱和区工作，给输出信号带来饱和失真。

2.3.2 分压式偏置电路

由R_{B1}、R_{B2}构成的分压式偏置电路，如图 1.1.8-28 所示，如果适当减小R_{B1}、R_{B2}阻值，使得$I_1\approx I_2\approx\frac{V_{CC}}{R_{B_1}+R_{B_2}}\gg I_B$，则静态$V_B=I_2R_{B_2}\approx\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC}$，可认为与$I_{CBO}$、$\bar{\beta}$和$V_{BE}$无关，不受温度影响，而仅被$R_{B1}$和$R_{B2}$的分压比所固定。静态$V_E$仅比$V_B$低$V_{BE}=0.6\sim0.7V$，如果$V_{BE}\ll V_B$，则静态$I_C\approx I_F=\frac{V_B-V_{BE}}{R_E}\approx\frac{V_B}{R_E}$，也可认为与管子参数无关，而不受温度影响，从而使静态工作点得以基本稳定。

这种偏置电路静态值的计算步骤与固定偏置电路的不同。首先用R_{B1}、R_{B2}的分压比确定静态$V_B=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC}$，$V_E=V_B-V_{BE}$，$I_C\approx I_E=\frac{V_E}{R_E}$，$V_{CE}=V_{CC}-I_C(R_C+R_E)$；然后由$\bar{\beta}$确定静态$I_B=\frac{I_C}{\bar{\beta}}$。

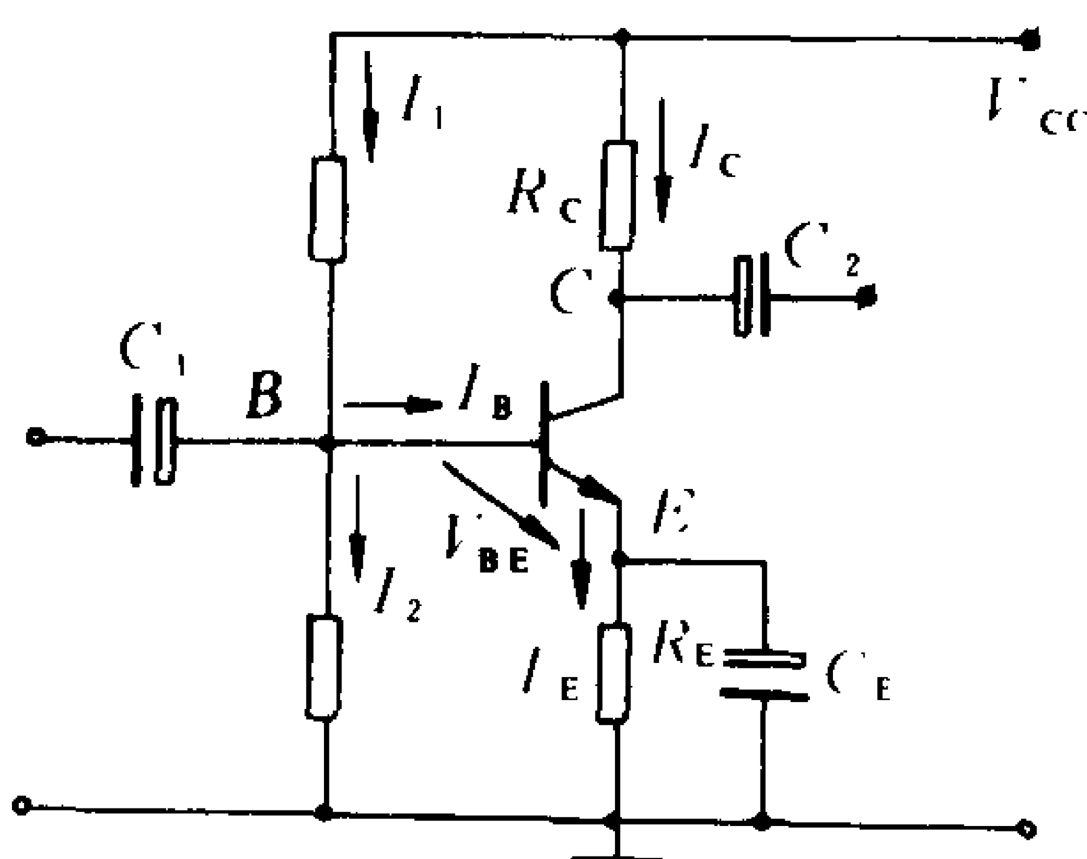


图 1.1.8-28 分压式偏置电路

2.4 晶体管微变等效电路和放大器的解析法

所谓放大电路的微变等效电路，就是把含非线性的晶体管等元件所组成的放大电路等效为一线性电路，也就是把晶体管线性化，等效为一线性电路。线性化的条件就是晶体管在小信号情况下工作。这样才能在静态工作点附近的小范围内，用直线段近似地代替晶体管的特性曲线。

2.4.1 晶体管的微变等效电路

从晶体管的输入、输出特性曲线上可以看到，V_{BE}和I_C都与I_B、V_{CE}有关，因此可写成：

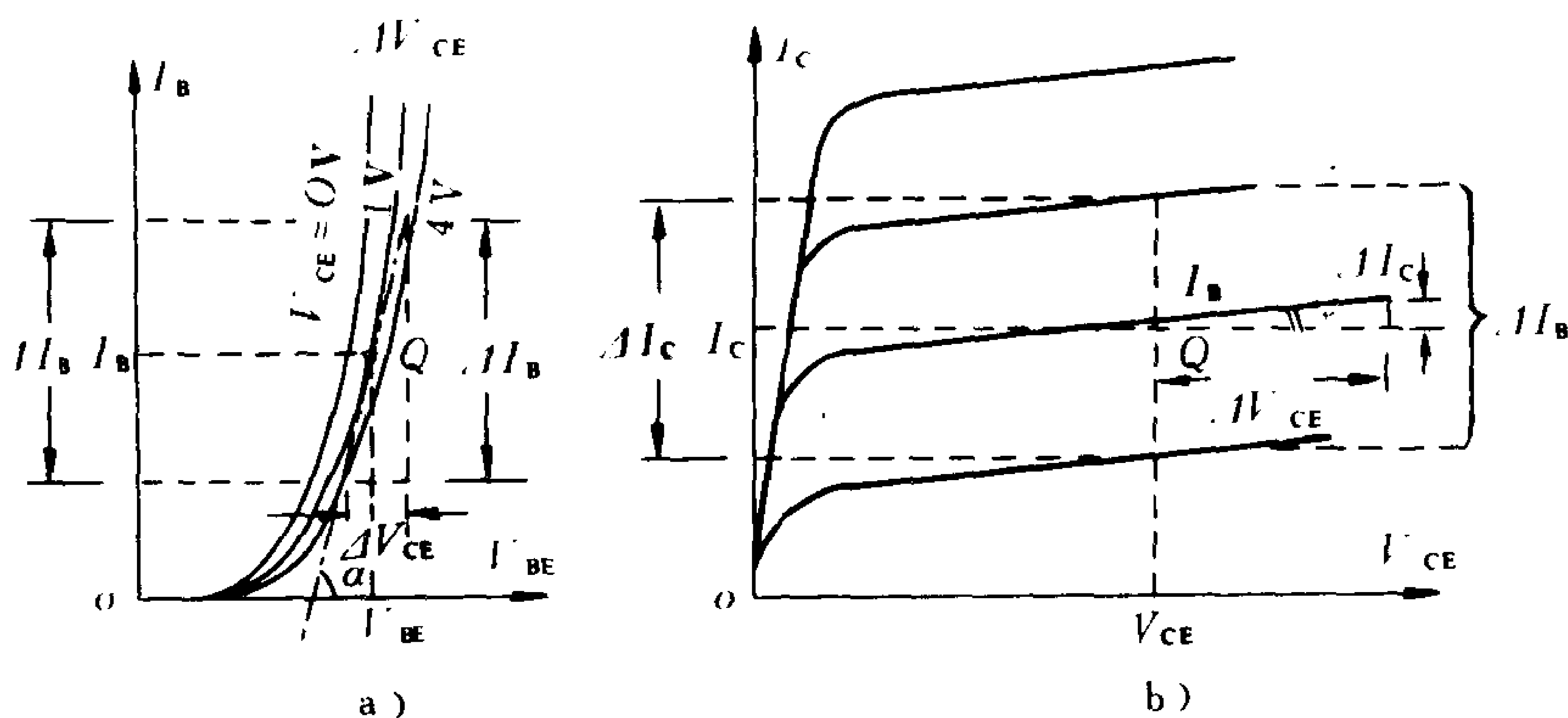


图 1.1.8-29　从管子特性上确定其动态参数

a)从输入特性上确定h_{ie}、h_{re}；b)从输出特性上确定h_{fe}、h_{oe}

$$V_{BE}=f_1(I_B, V_{CE}) \tag{1.1.8-1}$$

$$I_C=f_2(I_B, V_{CE}) \tag{1.1.8-2}$$

既然管子工作在小信号条件下，于是将上式取全微分，略去高阶项，且将各电压、电流增量以瞬时值表示，则有

$$\begin{cases} v_{be}=\dfrac{\partial v_{be}}{\partial i_b}i_b+\dfrac{\partial V_{be}}{\partial v_{ce}}v_{ce} \\ i_c=\dfrac{\partial i_c}{\partial i_b}i_b+\dfrac{\partial i_c}{\partial v_{ce}}v_{ce} \end{cases} \tag{1.1.8-3}$$

式中，i_b、v_{ce}的系数$\dfrac{\partial v_{be}}{\partial i_b}$、$\dfrac{\partial v_{be}}{\partial v_{ce}}$和$\dfrac{\partial i_c}{\partial i_b}$、$\dfrac{\partial i_c}{\partial v_{ce}}$可以用实验方法测定，或通过手册查出，也可以根据管子的输入、输出特性曲线求得。求取的方法参阅图 1.1.8-29。

$$\frac{\partial v_{be}}{\partial i_b}=\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\Big|_{V_{CE=const}}=\frac{1}{tg\alpha}=r_{be} \tag{1.1.8-4}$$

为输出端交流信号短路（即$v_{ce}=0$,或保持V_{CE}恒定）时，输入特性曲线上工作点Q处斜率之倒数，称为晶体管的动态输入电阻r_{be}，常以h_{ie}表示。r_{be}与静态值I_E、I_B有下列关系：

$$r_{be}=300+(1+\bar{\beta})\frac{26(mV)}{I_E(mA)}=300+\frac{26(mV)}{I_B(mA)}\ (\Omega) \tag{1.1.8-5}$$

$$\frac{\partial i_c}{\partial i_b}=\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\Big|_{V_{CE=const}}=\beta \tag{1.1.8-6}$$

为输出端交流信号短路（同前）时，输出电流与输入电流之比，也就是晶体管的动态电流放大系数，常以h_{fe}表示。

$$\frac{\partial v_{be}}{\partial v_{ce}}=\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\Big|_{I_{B=const}}=h_{re} \tag{1.1.8-7}$$

为输入端开路（即$i_b=0$，或保持I_B恒定）时，输入电压与输出电压之比，称为晶体管的动态反向电压反馈系数。由于不同V_{CE}的输入特性曲线族几乎重合，即V_{CE}对V_{BE}的影响甚小，所以h_{re}很小，在参与串联运算时，常将其忽略。

$$\frac{\partial i_c}{\partial v_{ce}}=\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\Big|_{I_{B=const}}=tgr=g_{ce} \tag{1.1.8-8}$$

为输入端开路(同前)时，输出特性曲线上工作点Q处的斜率，称为晶体管的动态输出电导g_{ce}，常以h_{oe}表示，其倒数称为晶体管的动态输出电阻r_{ce}。由于不同I_B的输出特性曲线都几乎与横

轴平行，即γ角甚小，所以g_{ce}很小，r_{ce}很大，在参与并联运算时，常将其忽略。

将h_{ie}、h_{fe}、h_{re}和h_{oe}代入到上式

$$\begin{cases} v_{be}=h_{ie}i_b+h_{re}v_{ce} \\ i_c=h_{fe}i_b+h_{oe}v_{ce} \end{cases} \tag{1.1.8-9}$$

在线性电路中，当输入信号和由它而引起的各响应都是正弦分量时，v_{be}、i_b、i_c和v_{ce}都可以用相量表示，于是上式又可写成

$$\begin{cases} \dot{V}_{be}=h_{ie}\dot{I}_b+h_{re}\dot{V}_{ce}\cdots\cdots① \\ \dot{I}_c=h_{fe}\dot{I}_b+h_{oe}\dot{V}_{ce}\cdots\cdots② \end{cases} \tag{1.1.8-10}$$

式①是输入回路的电压方程，表示晶体管的输入电压$\dot{V}_{be}$用以平衡输入电流$\dot{I}_b$在管子输入电阻r_{ce}上的电压降$h_{ie}\dot{I}_b$和同输出电压$\dot{V}_{ce}$成正比的受控电压源$h_{re}\dot{V}_{ce}$；式②是输出节点的电流方程，表示晶体管的输出电流$\dot{I}_c$等于与输入电流$\dot{I}_b$成正比的受控电流源$h_{fe}\dot{I}_b$同管子输出电导h_{oe}中的电流$h_{oe}\dot{V}_{ce}$之和。由此得到晶体管共射极h参数等效电路如图 1.1.8-30 a)。因h_{re}和h_{oe}都很小，图b）是忽略h_{re}、h_{oe}后的简化h参数等效电路。

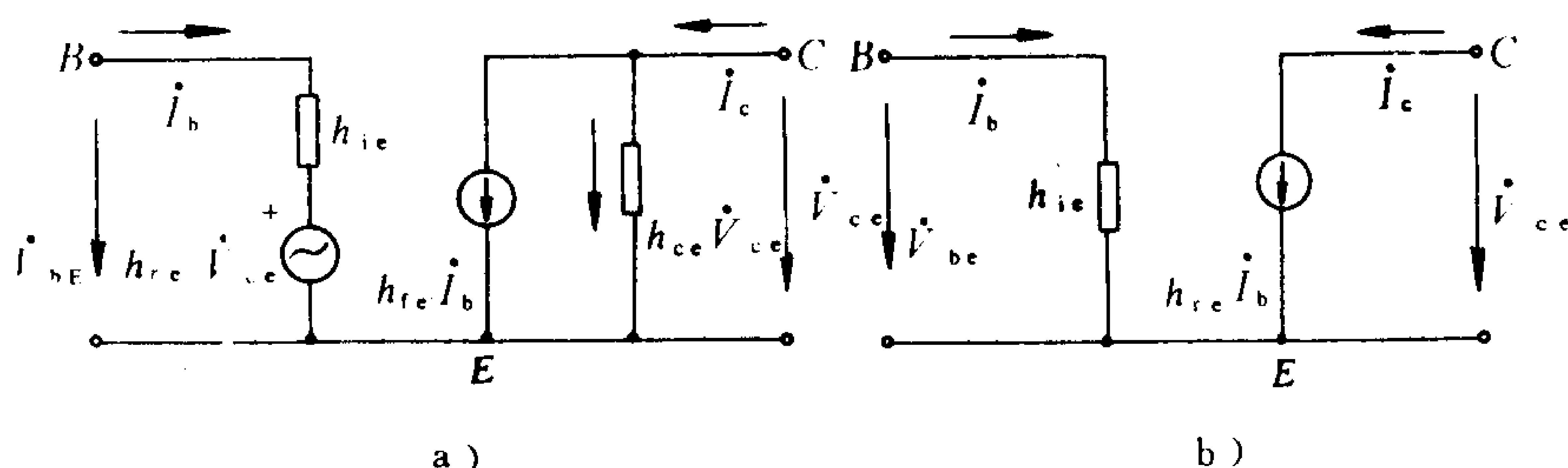


图 1.1.8-30 晶体管h参数等效电路

a)完整h参数等效电路；b)简化h参数等效电路

2.4.2 交流放大器的动态参数分析

图 1.1.8-31 a)是具有分压式偏置电路的交流放大器，其静态值的计算见 2.3.2；图中b）是它的交流通道；图中c）是交流放大器的微变等效电路。

1)输出电压$\dot{V}_0$对输入电压$\dot{V}_i$的电压增益$\dot{A}_V$

由图c)，$\dot{V}_i=\dot{I}_b r_{be}$，$\dot{V}_0=-\dot{I}_c Rl=-\beta\dot{I}_b Rl$，$Rl=\dfrac{R_C R_L}{R_C+R_L}$，则

$$\dot{A}_V=\frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_i}=-\beta\frac{Rl}{r_{be}} \tag{1.1.8-11}$$

如果放大器输出端开路（$R_L\longrightarrow\infty$），则

$$\dot{A}_{VO}=-\beta\frac{R_C}{r_{be}} \tag{1.1.8-12}$$

显然$A_{VO}>A_V$，R_L愈小，A_V愈小；适当增加R_C可提高A_V，但R_C过大，静态值太小，使r_{be}增加，反而使A_V降低。$\dot{A}_V$为负值，表示$\dot{V}_0$与$\dot{V}_i$反相位。

2)放大电路的输入电阻r_i

放大电路对信号源（或前级放大电路）而言是一个负载，希望r_i大些好。因为r_i大些可提高前级放大器的A_V，从信号源中取用较小的电流，减轻信号源的负担，提高进入放大电路的输入电压，也就提高了输出电压。由图中c)，$r_i=R_{B1}\|R_{B2}\|r_{be}$。

3)放大电路的输出电阻r_0

放大电路对负载（或后级放大电路）而言是一个信号源，其内阻即为放大电路的输出电

阻，希望小些好。因为r_0小些可提高加到负载或后级放大电路输入端的电压，减小输出电压的变化，提高放大电路带负载的能力。由图中c)，

$r_0=R_C \| \frac{1}{h_{oe}} \approx R_C$。

4) $\dot{V}_0$对信号源电压$\dot{E}_S$的电压增益$\dot{A}_{VS}$

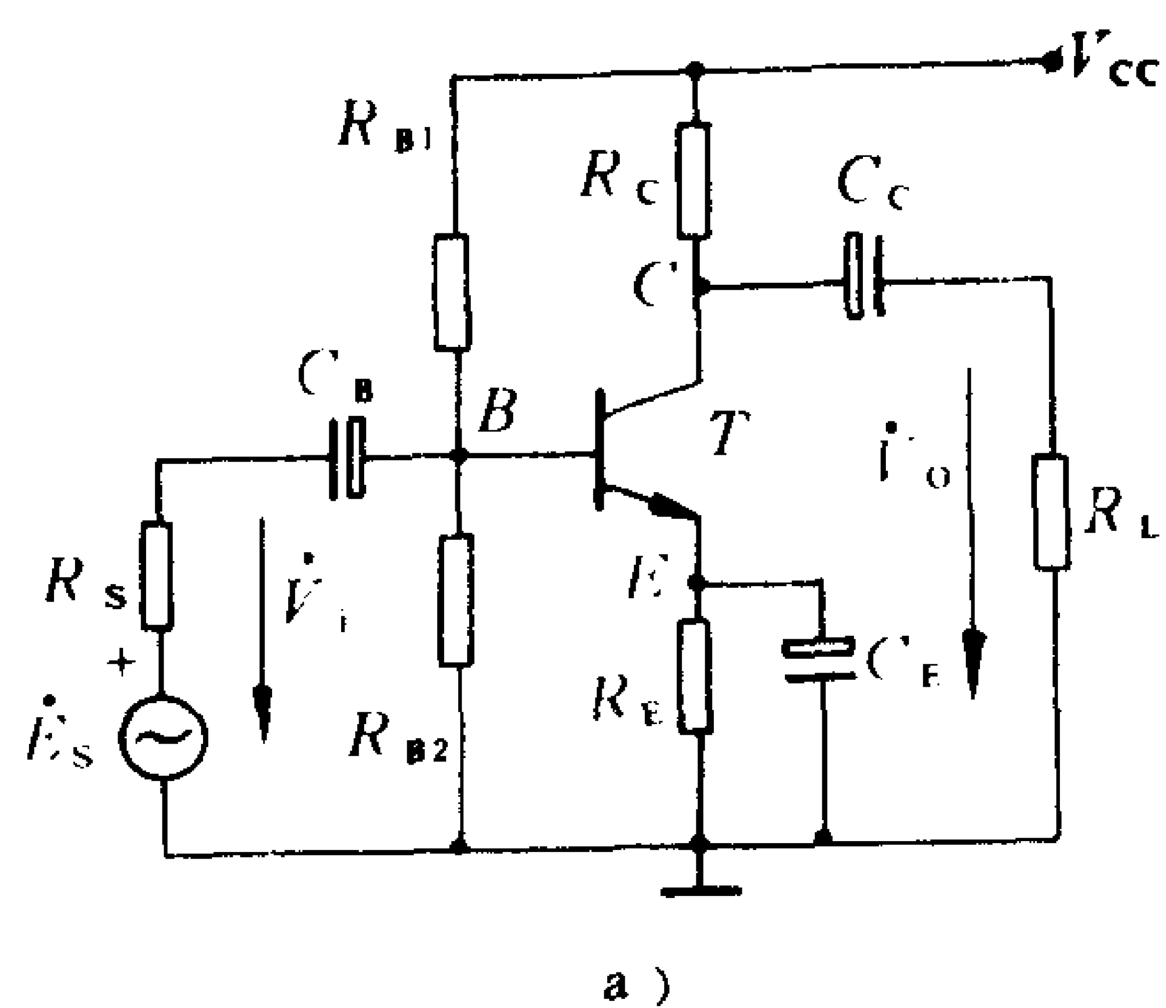
由图c)，$\dot{I}_i=\frac{\dot{E}_S}{R_S+r_i}$，$\dot{I}_b=\frac{r_i}{r_{be}}\dot{I}_i$，$\dot{V}_0=-\beta \dot{I}_b R_L'$，则

$$\dot{A}_{VS}=\frac{\dot{V}_0}{\dot{E}_S}=-\beta\frac{R_L'}{r_{be}}\cdot\frac{r_i}{R_S+r_i}=\dot{A}_V\frac{r_i}{r_i+R_S} \quad (1.1.8\text{-}13)$$

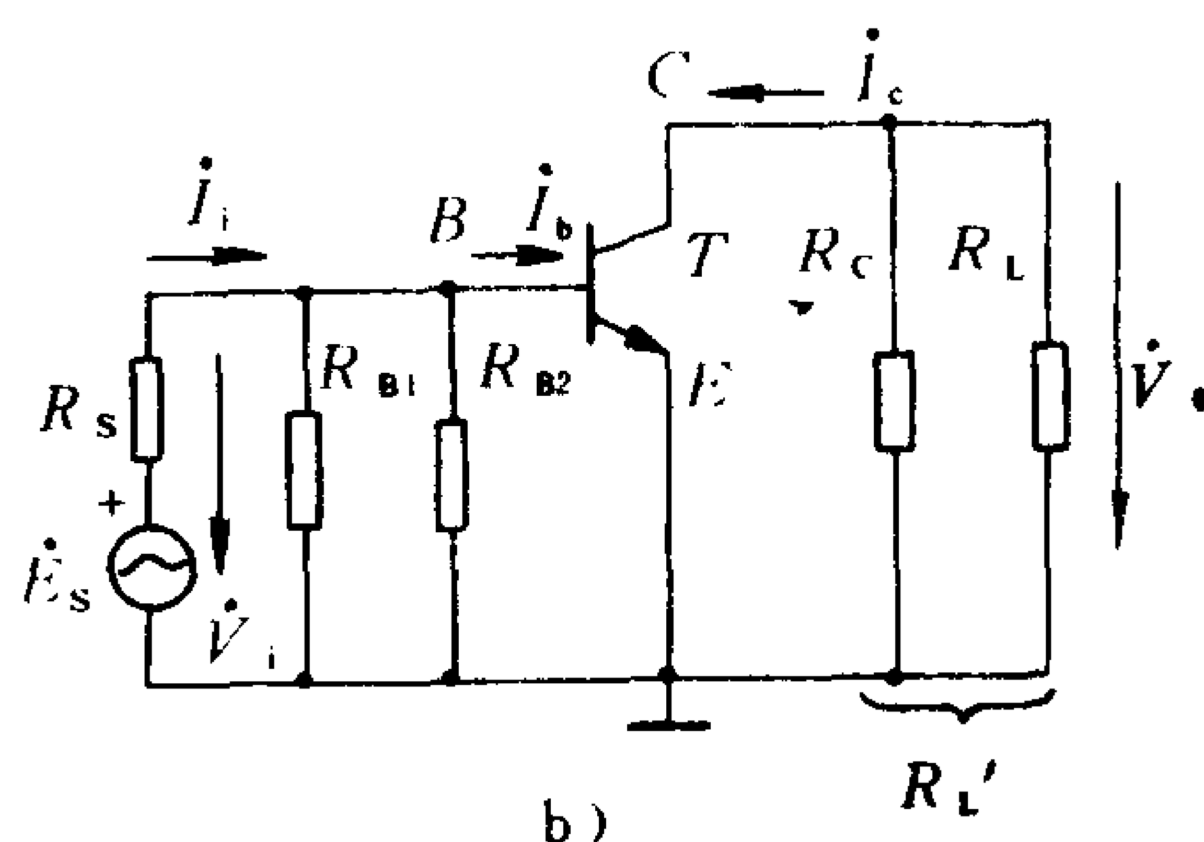
如果$r_i \approx r_{be}$，$\dot{A}_{VS}\approx-\beta\frac{R_L'}{R_S+r_{be}}$。

2.4.3 放大器的频率响应

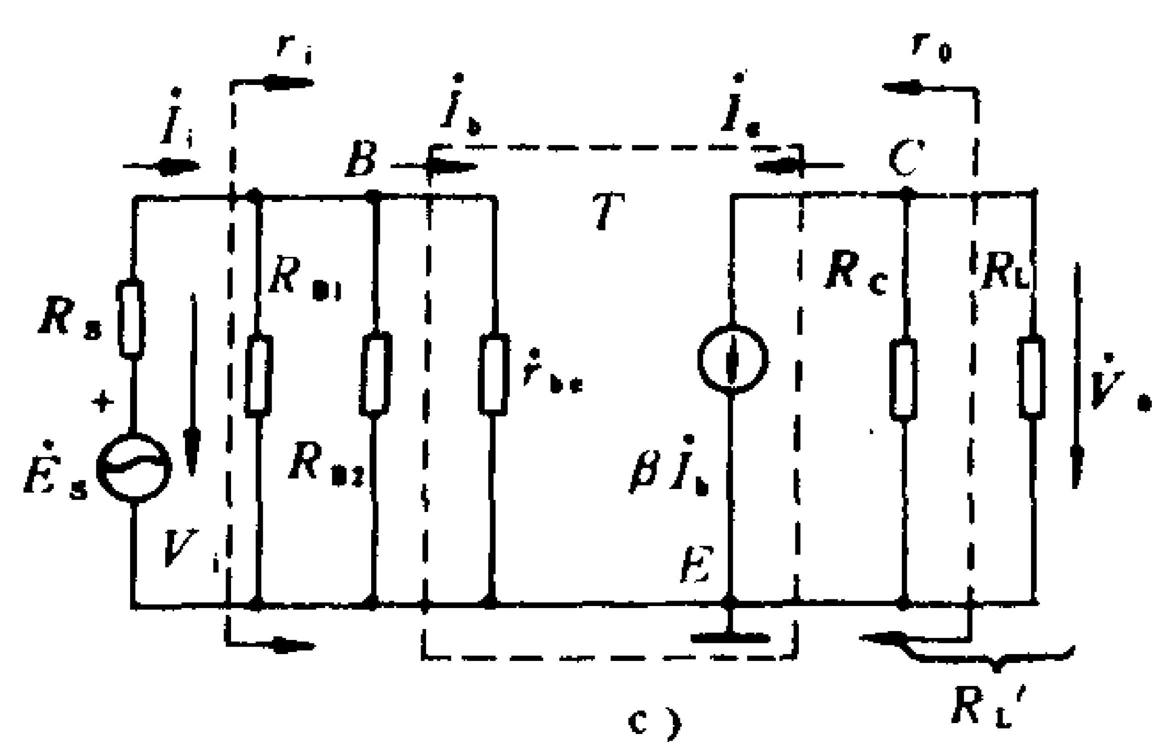
放大器在低频段由于耦合电容的容抗随信号频率的降低而明显增大，使信号传输受到损失；在高频段又由于晶体管的β随信号频率的升高而下降，以及晶体管结电容在高频段的分流效应增强，使放大器的幅频特性如图1.1.8-32。电压增益从中间频率的A_{VO}下降到$A_{VO}/\sqrt{2}$的高段频率f_H与低段频率f_L之差称为放大器的通频带。在这两个边频上，放大器的输出功率只有中间频率的$\frac{1}{2}$，故称f_H、f_L为半功率点频率，且电压增益较中频段衰减了3dB，即$20\lg\frac{A_{VH(L)}}{A_{VO}}=20\lg\frac{1}{\sqrt{2}}=-3(\text{dB})$，负号表示衰减。放大器的通频带过窄，将使信号的高、低频成分得不到与中频成分同等的放大，从而引起信号的频率失真。



a)



b)



c)

图 1.1.8-31　分压式偏置交流放大器
a)放大电路；b)交流通道；c)微变等效电路

2.5 阻容耦合放大器

放大器的级与级之间的联系称为耦合。电压放大器常以电容器作为耦合元件，前级放大器的输出信号通过耦合电容C_2接后级放大器的输入电阻r_{i2}，故称阻容耦合。两级阻容耦合放大器如图 1.1.8-33 a)，图b) 是它的中频段等效电路。

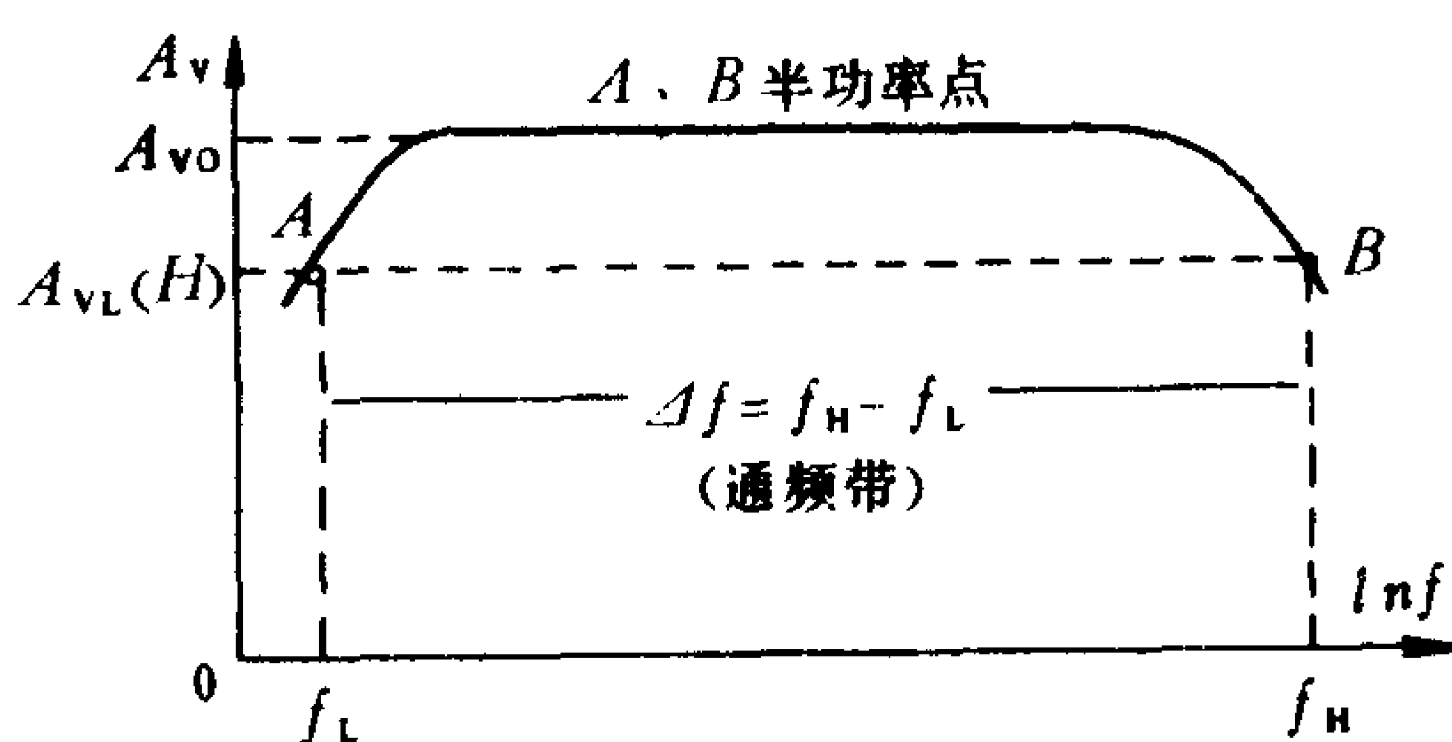


图 1.1.8-32　放大器的幅频特性

2.5.1 耦合放大器的电压增益

由图b)可知，第一、二级放大器的输入电

阻分别为，$r_{i1}=R_{B11}\|R_{B21}\|r_{be1}$，$r_{i2}=R_{B12}\|R_{B22}\|r_{be2}$；第一、二级的输出电阻分别为$R_{C1}$、$R_{C2}$；把第二级的输入电阻$r_{i2}$作为第一级的交流负载，则第一、二级的等效负载分别为$R_{L1}'=R_{C1}\|r_{i2}$，$R_{L2}'=R_{C2}\|R_L$；第一、二级的电压增益分别为$\dot{A}_{v1}=\frac{\dot{V}_{01}}{\dot{V}_i}=-\beta_1\frac{R_{L1}'}{r_{be1}}$，$\dot{A}_{v2}=\frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_{i2}}=-\beta_2\frac{R_{L2}'}{r_{be2}}$；两级总电压增益为$\dot{A}_v=\frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_i}=\frac{\dot{V}_{01}}{\dot{V}_i}\cdot\frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_{i2}}=\dot{A}_{v1}\cdot\dot{A}_{v2}=\beta_1\beta_2\frac{R_{L1}'R_{L2}'}{r_{be1}r_{be2}}$。$A_v$为一正实数，表明输入信号经过两级放大器放大后，在中频段，其输出$\dot{V}_0$与输入$\dot{V}_i$同相位。

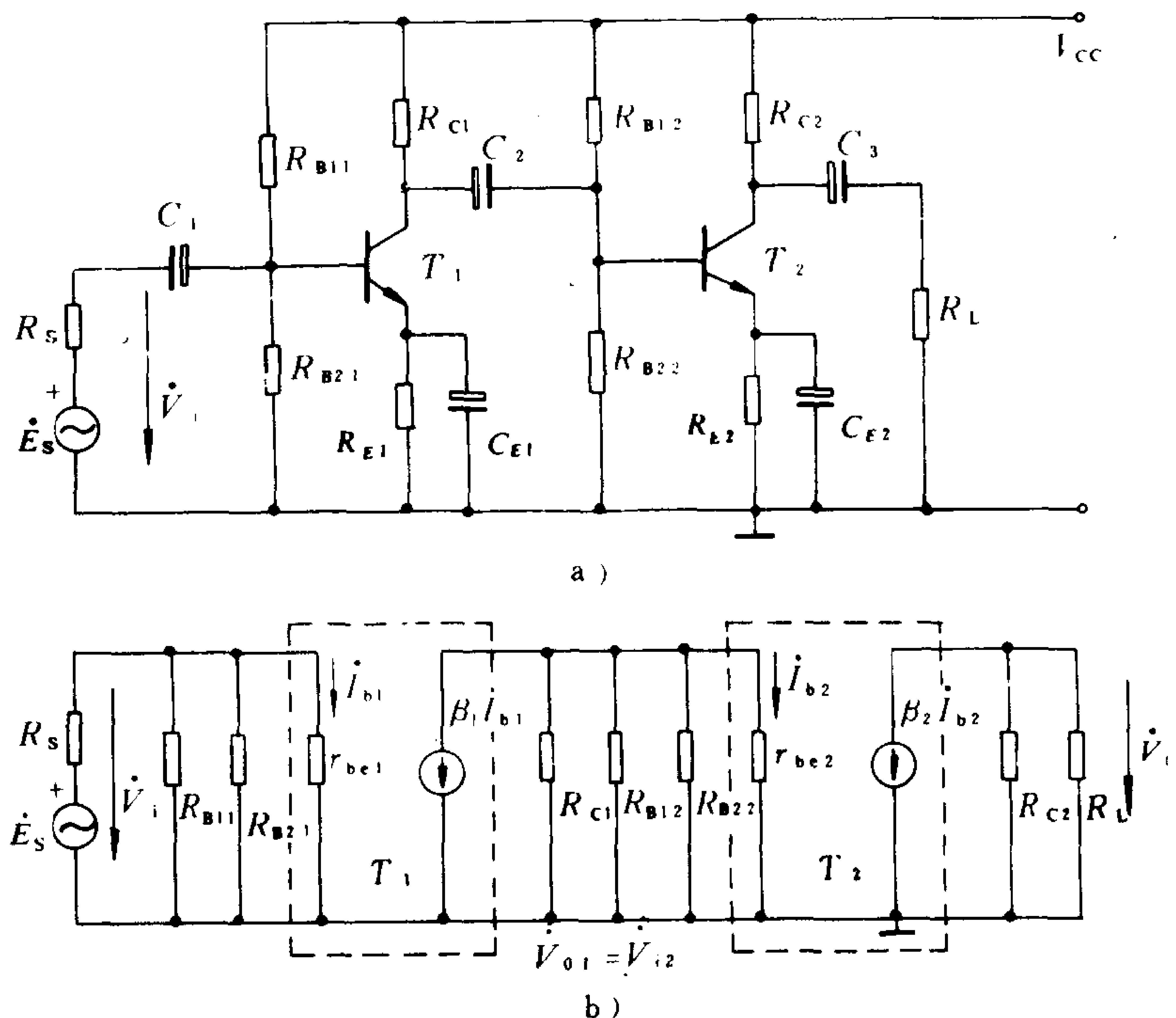


图 1.1.8-33　两级阻容耦合放大器
a)基本电路；b)等效电路

2.5.2　耦合放大器的频率响应

设每级中频段电压增益相同，通频带也相同，如图 1.1.8-34 中a）所示，则两级总电压增益的幅频特性的通频带变窄（图b），且级数愈多，通频带愈窄。

2.6　场效应管电压放大器

场效应管具有输入电阻高的特点，它最适用于作为多级放大器的输入级。

2.6.1　电路的组成和静态值的计算

图 1.1.8-35 a)是由N沟道结型（或绝缘栅耗尽型）场效应管组成的共源极接法的低频电压放大器。R_G、R_S、R_D分别为栅、源、漏极电阻。静态时，I_D经R_S产生电压降I_DR_S，将V_S抬高，而栅源间不导电，通过R_G将V_G拉到地电位。这种不用另加直流电源而获得的负栅偏压，叫做自给栅偏压。对于绝缘栅增强型管子，自给栅偏压的极性是不满足控制要求的，必须另外设置分压式偏置

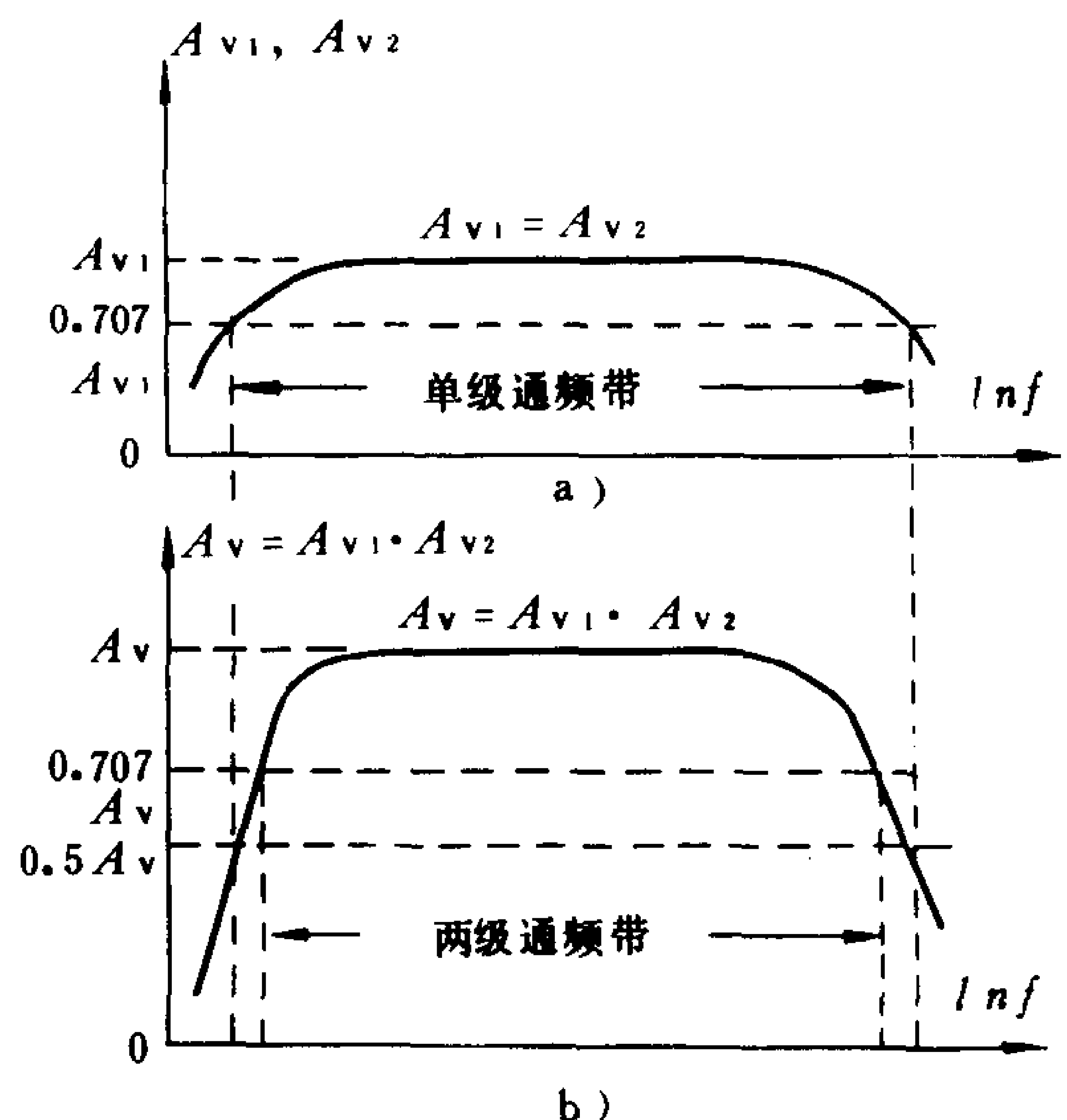


图 1.1.8-34　两级放大器的通频带
a)单级幅频特性；b)两级幅频特性

电路，如图 1.1.8-35 b)所示。图中电容C_G、C_S、C_D和电阻R_S、R_D的作用与双极型晶体管放大电路的相同。

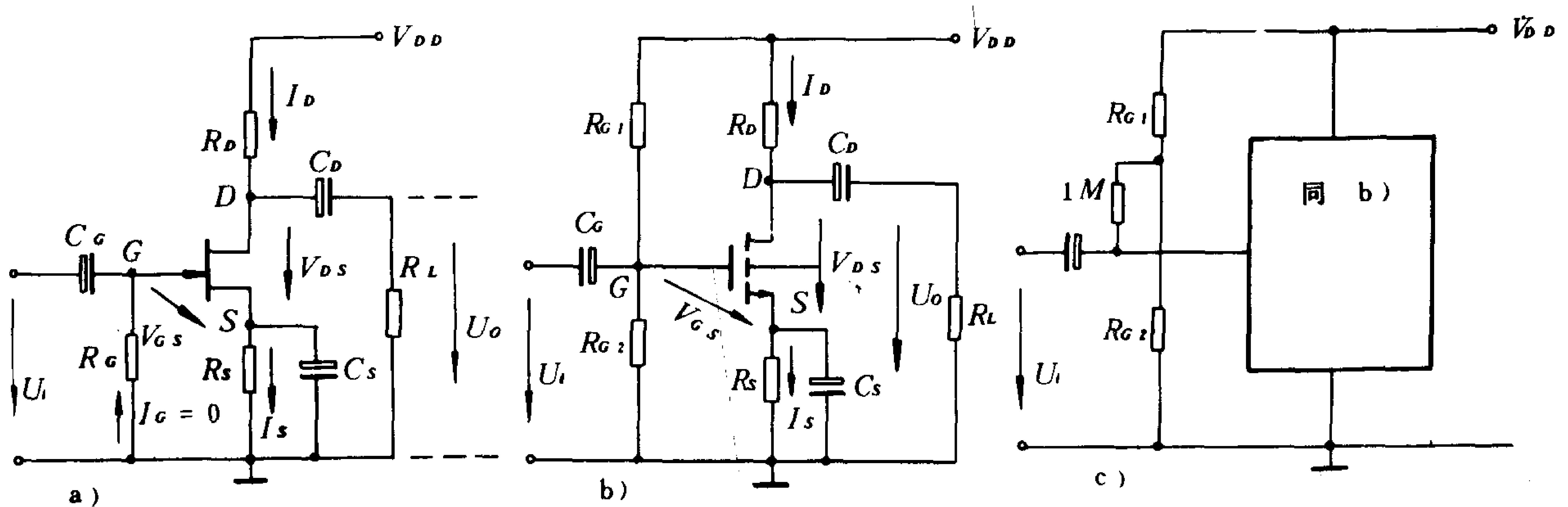


图 1.1.8-35 场效应管低频放大器

a)N沟道结型自给偏置电路；b)N沟道增强型绝缘栅管偏置电路；c) b) 的改进偏置电路

图a)静态值的计算：由输入回路，$V_{GS}+I_SR_S=0$；输出回路，$V_{DS}=V_{DD}-I_D(R_D+R_S)$；此外，$I_D=I_{DSS}(1-|\frac{V_{GS}}{V_P}|)^2$。由此可解出三个静态值$V_{GS}$、$I_D$、$V_{DS}$。但通常还是利用管子的特性曲线和直流负载线确定静态工作点。

对于图b) 所示N沟道增强型管子，其静态值的计算方法与双极型晶体管的类似。$V_{GS}=V_G-V_S=\frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}}V_{DD}-I_DR_S>0$，且通常满足$V_G=\frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}}V_{DD}\gg V_{GS}$，即$I_DR_S\approx\frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}}V_{DD}$；由输出回路，$V_{DS}=V_{DD}-I_D(R_S+R_D)$。

2.6.2 场效应管放大器的动态分析

因为结型场效应管的栅-源（漏）极之间都是反偏的PN结，绝缘栅场效应管的栅极与另外两个电极是绝缘的，所以场效应管正常工作时栅流为零，输入回路是开路的。对漏极特性曲线$I_D=f(V_{DS},\ V_{GS})$微分：

$$dI_D=\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}dV_{GS}+\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}dV_{DS}=g_m dV_{GS}+\frac{1}{r_d}dV_{DS} \tag{1.1.8-14}$$

式中，$g_m=\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}=\frac{dI_D}{dV_{GS}}|_{V_{GS=const}}$ 为场效应管的动态跨导；$\frac{1}{r_d}=\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}=\frac{dI_D}{dV_{DS}}|_{V_{GS=const}}$ 为其动态内导，r_d为动态内阻。再将微分量用变化量的瞬时值代替，上式可写成

$$i_D=g_m v_{GS}+\frac{1}{r_d}v_{DS} \tag{1.1.8-15}$$

在线性电路中，如果输入信号v_i及其由它引起的诸变化量都是正弦的，则上式可进一步用相量表示为：

$$\dot{I}_D=g_m\dot{V}_{GS}+\frac{1}{r_d}\dot{V}_{DS} \tag{1.1.8-16}$$

这表明$\dot{I}_D$是由与$\dot{V}_{GS}$成正比的受控电流源的电激流$g_m\dot{V}_{GS}$与$\dot{V}_{DS}$成正比的电流$\dot{V}_{DS}/r_d$之和。于是便得到如图1.1.8-36 a）所示的微变等效电路。又由于漏极特性曲线族在放大区几乎都与

横轴平行，故动态内阻r_d很大，在参与并联运算时，常将其忽略，于是图a）可简化为图b）。

场效应管线性化后，图 1.1.8-35 所示放大电路就可以改为如图 1.1.8-37 所示的放大器微变等效电路，其动态参数为：

电压增益 $\dot{A}_V=\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=-\frac{g_m\dot{V}_iRl}{\dot{V}_i}=-g_mRl$，$Rl=R_D /\!/ R_L$，负号表示相位相反；

输入电阻 $r_i=R_G$或$R_{G1} /\!/ R_{G2}$；

输出电阻 $r_o=R_D /\!/ r_d\approx R_D$。

为了提高放大器的输入电阻，图 1.1.8-35 a）中的R_G可达数兆欧，对于图 1.1.8-35 b）也可以作如图 1.1.8-35 c）那样改进，改进后的等效电路如图 1.1.8-37 b）所示，其输入电阻$r_i=1M\Omega+R_{G1} /\!/ R_{G2}$。

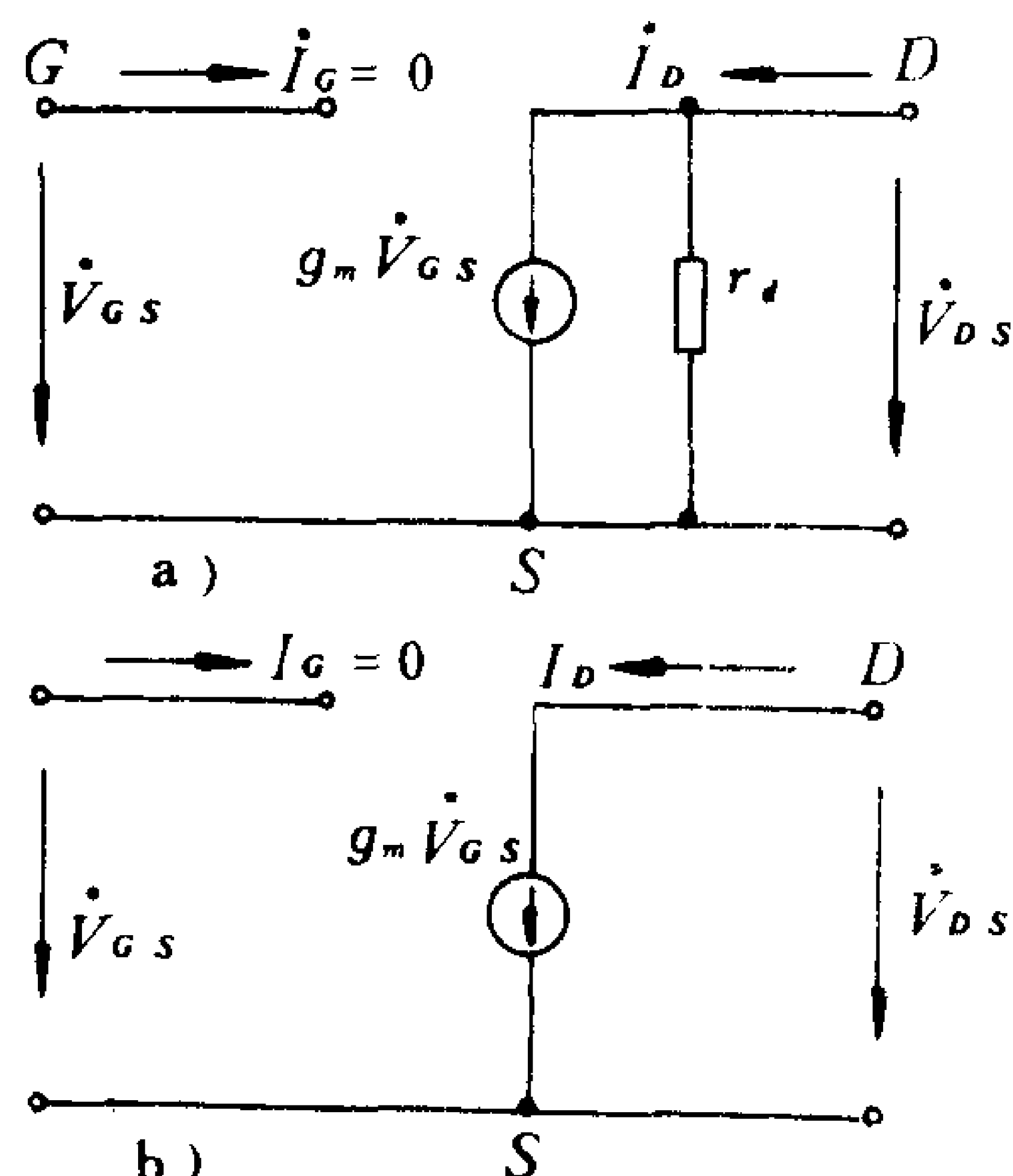


图 1.1.8-36 场效应管微变等效电路
a)完整的等效电路；b)简化的等效电路

2.7 功率放大器

多级放大器的末级或末前级一般都是功率放大器，将前置电压放大级送来的电压信号进行功率放大，去推动负载工作。为了充分利用晶体管的放大性能，功率放大器中的晶体管都工作在接近极限参数（P_{CM}、I_{CM}、BV_{CEO}）边缘。然而末级负载电阻的阻值往往很小，无法直接满足这一要求。为此，除选定合适的静态工作点外，常采用匹配变压器，将负载电阻转换为满足管子工作于极限参数的要求。

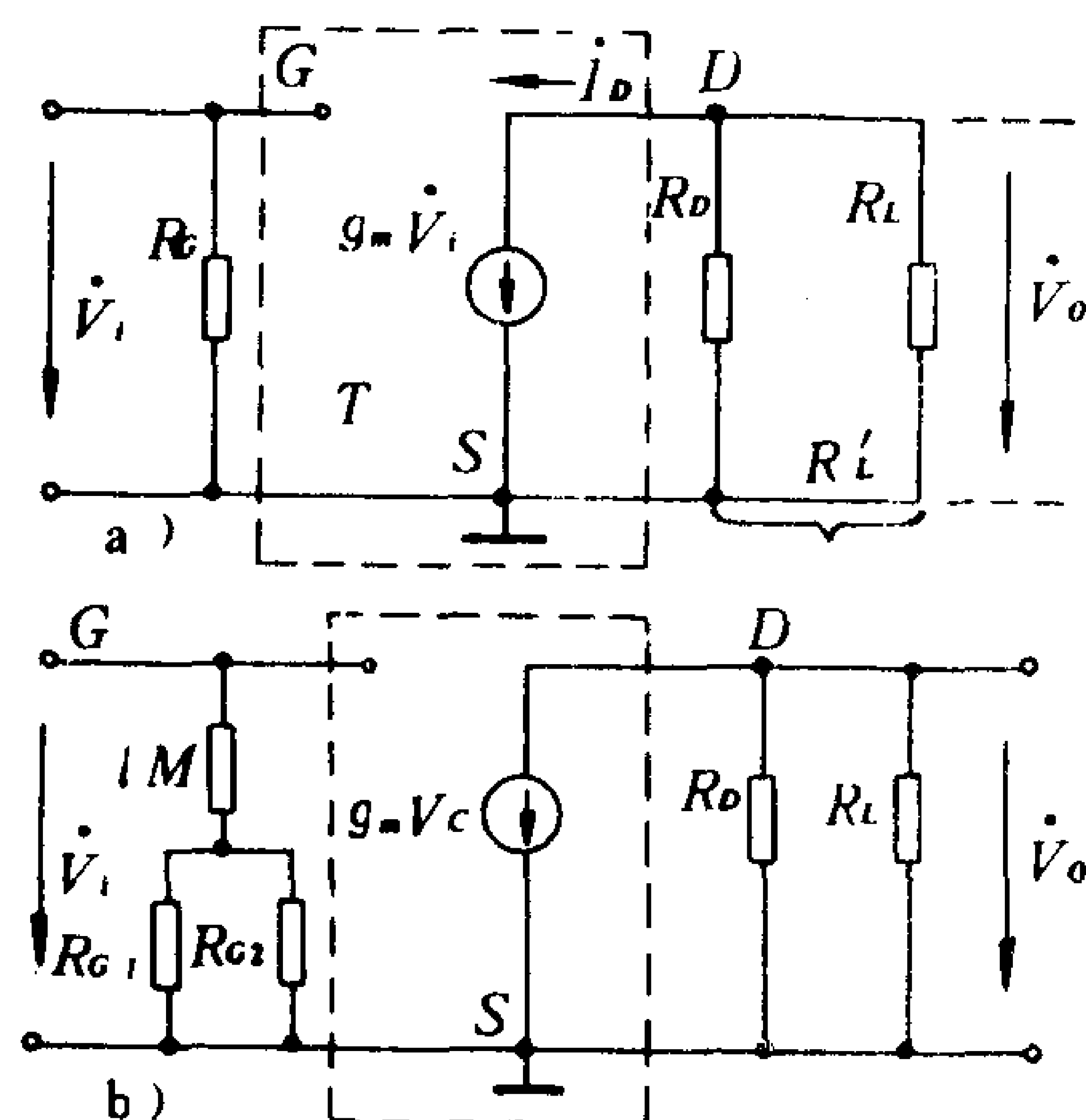


图 1.1.8-37 场效应管放大器微变等效电路
a)基本型；b)改进型

2.7.1 单管（边）功率放大器

如图 1.1.8-38 所示，T_i、T_o为输入、输出变压器，既起隔直耦合作用，也可实现阻抗转换；R_{B1}、R_{B2}、R_E、V_{CC}组成分压式偏置电路，静态值由它们确定；C_B、C_E为交流信号旁路电容。各静态值为：$V_B=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC}$，$V_E=I_ER_E=V_B-0.7\,V\approx V_B$，$I_E=\frac{V_E}{R_E}\approx\frac{V_B}{R_E}\approx I_C$，$V_{CE}=V_{CC}-I_ER_E\approx V_{CC}$；$I_C\approx\frac{V_B}{R_E}$与$V_{CE}\approx V_{CC}$的交点即为静态工作点。为了充分利用晶体管，常取$V_{CC}\lesssim\frac{1}{2}BV_{CEO}$，$I_C\lesssim\frac{1}{2}I_{CM}$，但在管子输出特性曲线上，过$2I_C$、$2V_{CC}$所作直线$Q_1Q_2$，一定不能穿过最大允许耗散功率$P_{CM}=I_CV_{CE}$双曲线，最多只允许同它相切。由交流负载线$Q_1Q_2$可求得管子集电极等效负载电阻$Rl=\cot\alpha=\frac{V_{CC}}{I_C}\approx(R_{B1}+R_{B2})\frac{R_E}{R_{B2}}$，再根据接在$T_o$次级实际负载电阻$R_L$，即可求出$T_o$的变压比$k_V=\frac{N_1}{N_2}=\sqrt{\frac{Rl}{R_L}}=\sqrt{\frac{V_{CC}}{I_CR_L}}$。

这种功率放大器的静态工作点Q设置在交流负载线的中点，当$i_b=I_{bm}\sin\omega t$，且其最大动态范围不超过图1.1.8-39的Q_1、Q_2两点时，i_c、v_{ce}都为正弦波。这种放大器称为甲类功率放大器。甲类放大器的最高效率不超过50%。这种放大器在输入信号的负半周期中，瞬时值v_{ce}将超过电源电压V_{CC}，最高可达2 V_{CC}。所以常取V_{CC}不超过$\frac{1}{2}BV_{CEO}$，否则管子有可能被击穿。

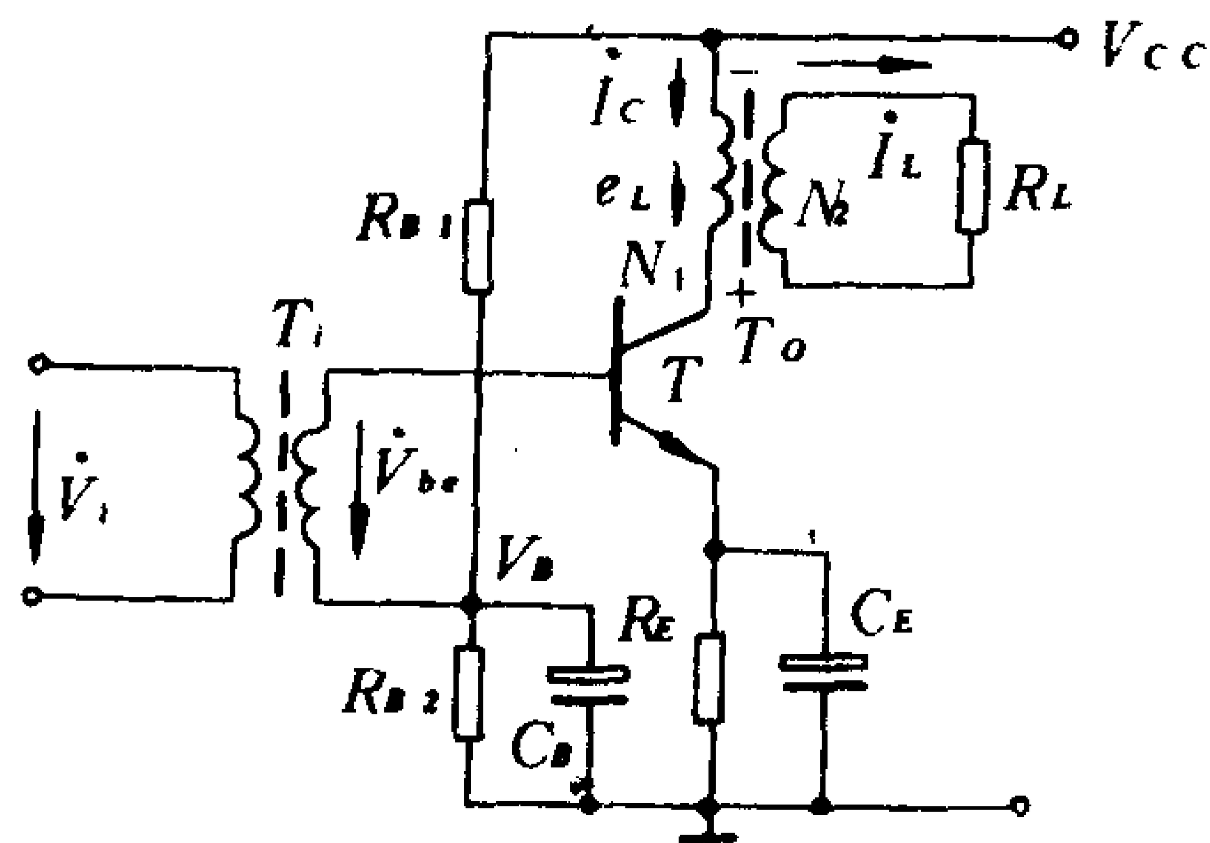


图1.1.8-38　变压器耦合单管功率放大器

2.7.2　推挽功率放大器

单管功率放大器效率低的原因在于静态电流I_C较大，但减小I_C，又会产生波形失真。推挽电路可解决这一矛盾。图1.1.8-40 a）所示是这种放大器的典型电路。带中心抽头的输入变压器T_1将输入信号v_i进行倒相（分解），以相反的相位加于两管的基极（即$\dot{V}_{i1}=-\dot{V}_{i2}$）。带中心抽头的输出变压器$T_0$，将两管轮流放大后的$i_{c1}$、$i_{c2}$，通过磁路合成为输出信号$i_0$、$v_0$。$T_1$、$T_0$除对信号进行分解，合成外，同时实现了阻抗的匹配和转换。这种静态工作点Q较低，I_C较小，用以消除交越失真的，称为甲乙类功率放大器。而把静态工作点Q降低到I_C为零的，称为乙类放大器。乙类放大器无法消除交越失真，如图1.1.8-41所示。

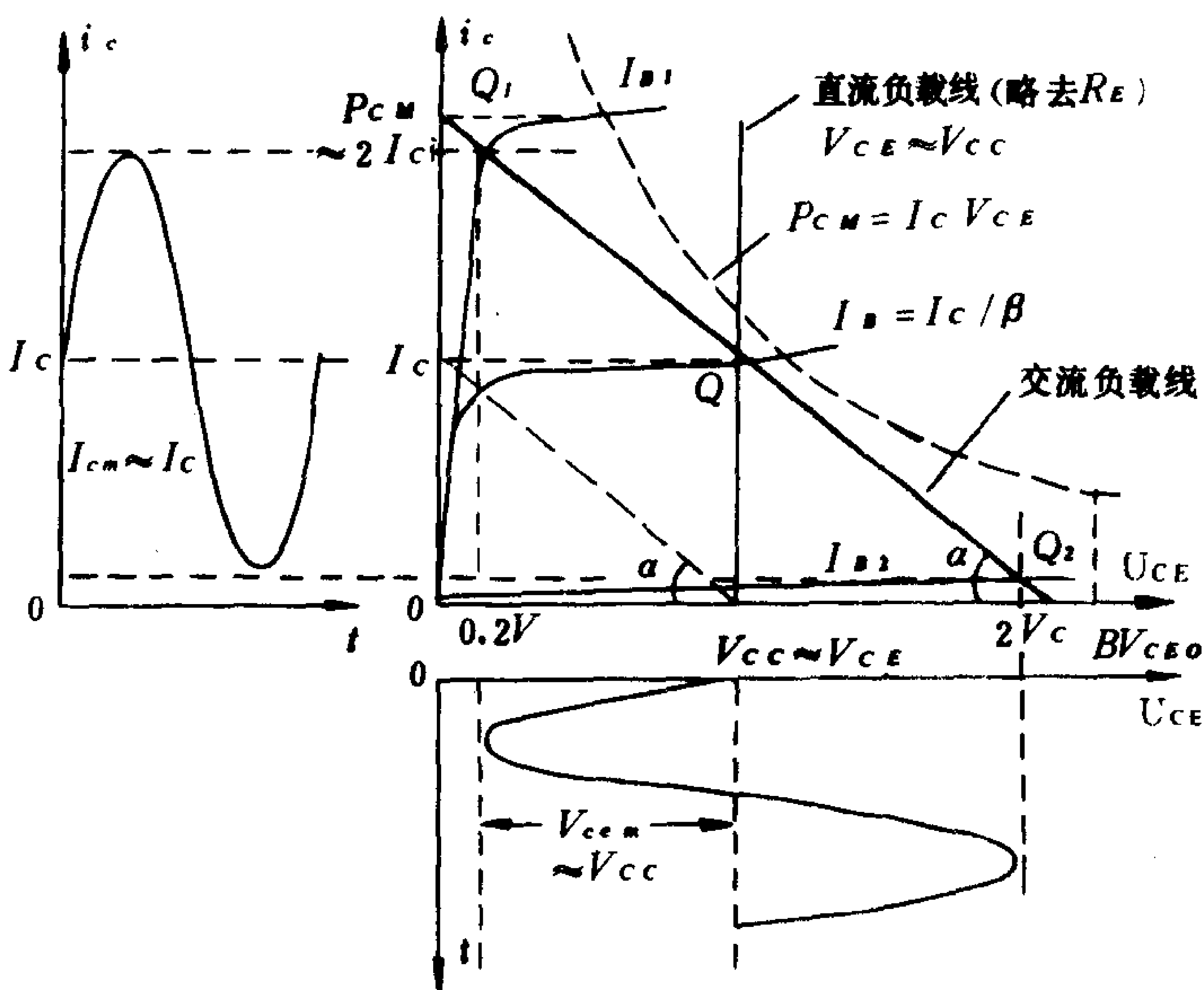


图1.1.8-39　单管功率放大器的图解分析

甲乙类功率放大器在输出最大不失真功率$P_{om}=\frac{1}{2}V_{cc}I_{cm}$（$I_{cm}$是动态负载线在纵轴上的交点），并且忽略管子约0.2 V饱和压降和很小的静态I_C（为了消除交越失真）时，最高效率可达78.5%（这是纯乙类的理论值）。这一状态下两管的总损耗P_T为$0.273P_{om}=0.1366V_{cc}I_{cm}$，直流电源供给的功率$P_E=\frac{2}{\pi}V_{cc}I_{cm}=0.6366V_{cc}I_{cm}$。当输出功率$P_o=0.4P_{om}$时，两管总损耗也为$0.4P_{om}$，且达最大值，效率为50%，所以为了提高效率，降低管耗，放大器最好能工作在最大输出功率状态。

变压器耦合功率放大器的主要缺点是体积、重量较大，而且成本也较高，另外，频率响应也较差。所以近年来无输出变压器(OTL)电路得到了广泛的应用。

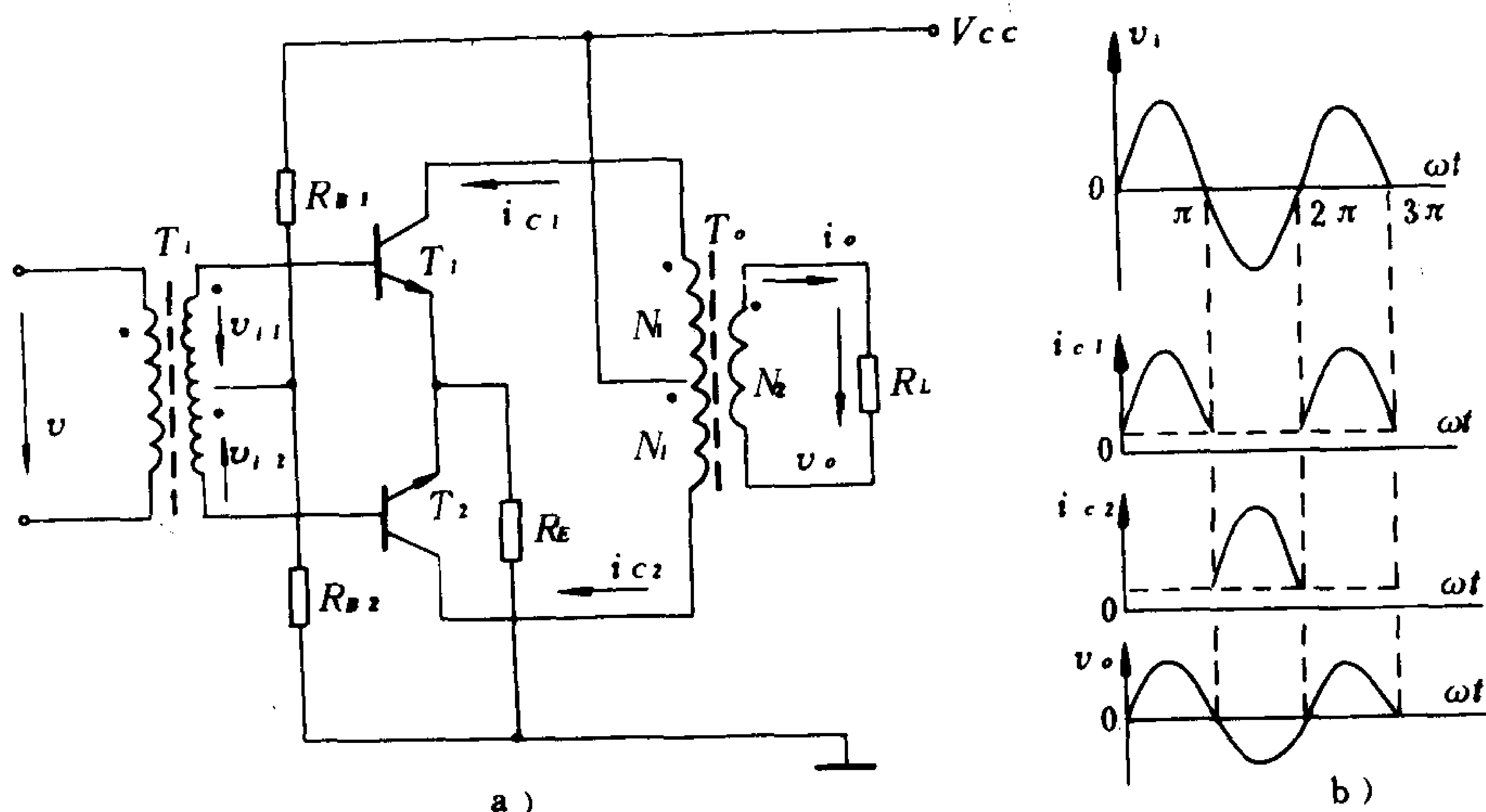


图 1.1.8-40　甲乙类推挽功率放大器

a)甲乙类放大器的基本电路；b)甲乙类放大器的波形

3　反馈放大器

3.1　反馈的定义和分类

反馈就是把放大器输出端的电压或电流信号的一部分或全部，通过一定的电路回送到放大器的输入端而达到某种目的的一项措施。如果回送到输入端的反馈量与输出电压成正比，叫做电压反馈；如果与输出电流成正比，那就叫电流反馈；如果反馈电压信号与输入电压信号是以回路相串联的形式叠加后再作用到放大器的输入端，这种反馈称为串联反馈；如果反馈电流信号与输入电流信号是以节点相并联的形式叠加后再送到放大器的输入端，这种反馈称为并联反馈；如

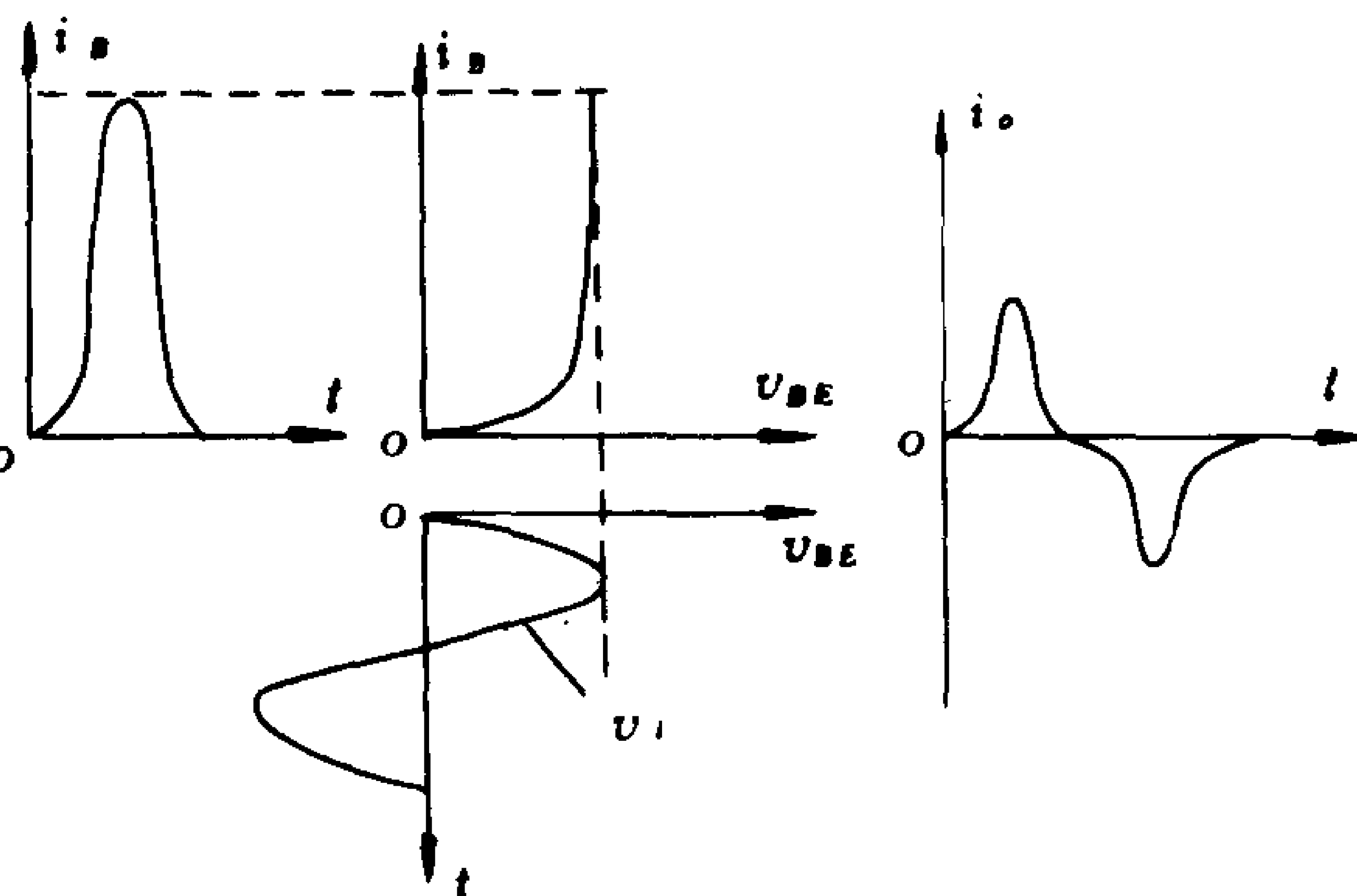


图 1.1.8-41　交越失真的由来

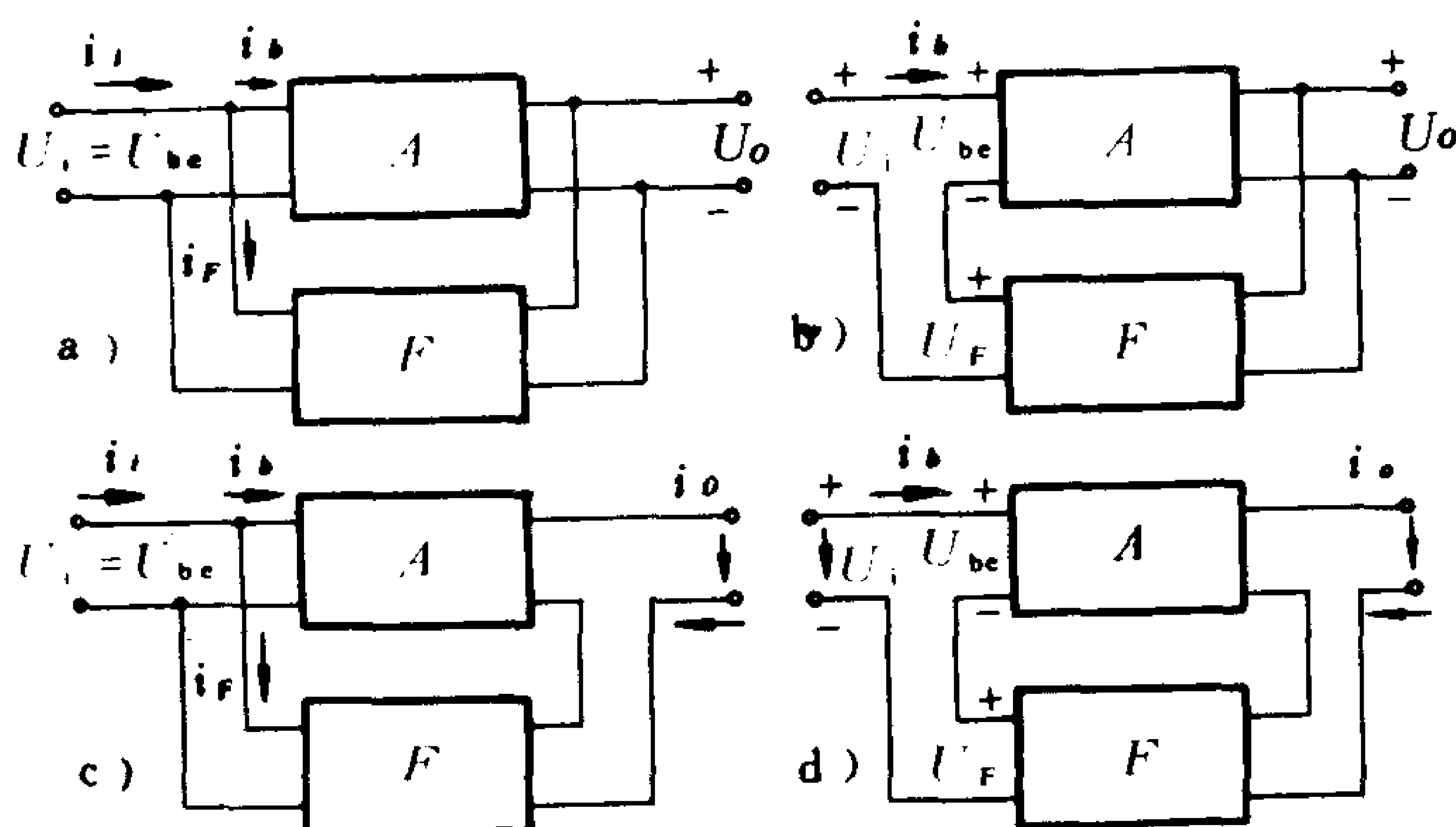


图 1.1.8-42　反馈放大器的类别及其连接方式

a)电压并联反馈；b)电压串联反馈；

c)电流并联反馈；d)电流串联反馈

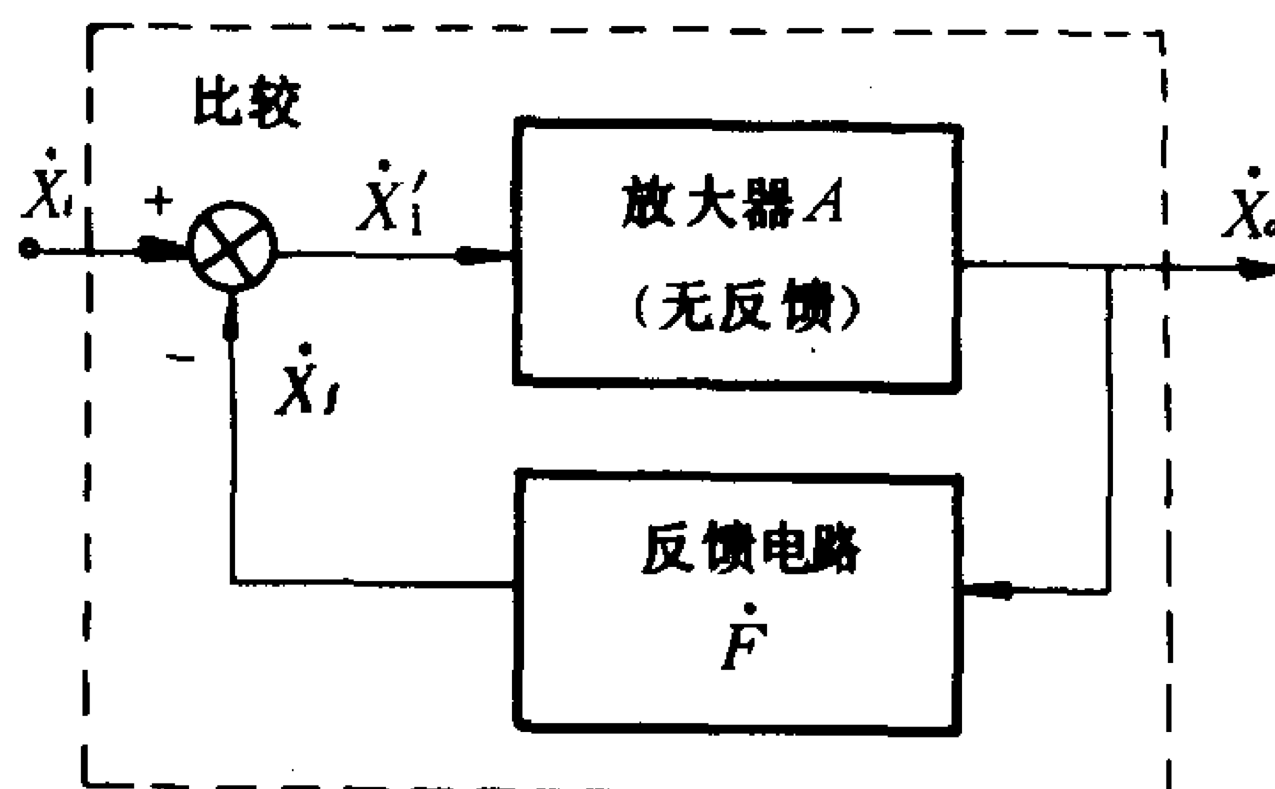


图 1.1.8-43　反馈放大器的方框图

果反馈信号与输入端原有信号相位相反，起削弱原有信号的作用，这种反馈称为负反馈；反之，如果与输入端原有信号相位相同，起增强原有信号的作用，称为正反馈。根据反馈信号

从输出信号中取出的方式来分，有电压反馈和电流反馈两种；根据反馈信号与输入信号的迭加方式来分，有串联反馈和并联反馈两种。它们的框图如图 1.1.8-42。为了便于分析，不论图中哪一种反馈放大器电路，都可以用图 1.1.8-43 更为简便的方框图表示。

3.2 负反馈对放大器性能的影响

3 2.1 降低放大器的增益

图 1.1.8-43 中的 ⊗ 是比较环节，其输出 $\dot{x}_i'=\dot{x}_i-\dot{x}_f$；把不带反馈的放大器 $\dot{A}$ 的输出 $\dot{x}_0$ 与其净输入 $\dot{x}_i'$ 之比，即 $\dot{A}=\frac{\dot{x}_0}{\dot{x}_0}$，称为放大器的开环增益；把 $\dot{x}_f$ 与 $\dot{x}_0$ 之比，即 $\dot{F}=\frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_0}$，称为反馈电路的反馈系数；而将 $\dot{A}_f=\frac{\dot{x}_0}{\dot{x}_i}$，称为反馈放大器的闭环增益。由以上关系得：

$$\dot{A}_f=\frac{\dot{A}}{1+\dot{F}\dot{A}} \tag{1.1.8-17}$$

在负反馈情况下，$\dot{F}\dot{A}=\frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_i'}$ 一般为正实数，可见 $A_f<A$。F 愈接近于1,反馈愈深，A_f 愈小。$1+FA$ 称为反馈深度，其值愈大，负反馈作用愈强，A_f 也就愈小。

3.2.2 提高增益的稳定性

当外界条件变化（例如环境温度变化，元件参数变化，管子老化，电源电压波动等）时，即使输入信号幅度不变，也将引起输出信号幅度变化，即引起增益变化。如果这一相对变化量较小，我们就说放大器增益的稳定性较高。放大器引入负反馈后，其增益的相对变化 dA_f/A_f 是未引入负反馈的增益的相对变化 dA/A 的 $\frac{1}{1+FA}$。

3.2.3 减小非线性失真和抑制干扰

非线性失真就是由于管子不是线性元件，在放大器输出端产生了输入信号中所没有的谐波成分。设放大器在未引入反馈时，其输出信号 $\dot{x}_0=\dot{A}\dot{x}_i'+\dot{x}_0'$，$\dot{A}\dot{x}_i'$ 是净入信号 $\dot{x}_i'$ 经放大后的基波成分，$\dot{x}_0'$ 是放大器由于管子的非线性而产生的，在放大器输出端出现的谐波成分。放大器引入负反馈后，其输出端的谐波成分为 $\dot{x}_0''=\frac{\dot{x}_0'}{1+FA}$，即引入负反馈后，谐波成分比没有反馈时的减小（$1+FA$）倍。放大器内部的噪声（由载流子热运动所引起的）同样可受到抑制，减小（$1+FA$）倍。

3.2.4 展宽通频带

放大器引入负反馈后可以扩展通频带。因为在中频段开环增益较高，反馈信号较强，因而使闭环增益下降得较多；而在低（高）频段，开环增益较小，反馈信号也较弱，因而使闭环增益下降得较少，于是便把放大器的通频带展宽了，如图 1.1.8-44。

引入负反馈后，上限频率可增高为 $f_{hf}=f_h(1+FA)$，即比无反馈时的上限频率 f_h 增加了 $(1+FA)$倍；下限频率可降低为 $f_{lf}=\frac{f_l}{1+FA}$，即比无反馈时的下限频率 f_l 降低了$(1+FA)$倍。

3.2.5 负反馈对放大器输入电阻的影响

放大器引入负反馈后，使输入电阻增大还是减小，与反馈电路同输入端的联接方式有关：并联负反馈使输入电阻减小，串联负反馈使输入电阻增大。

由图 1.1.8-42 b)、d) 所示串联负反馈放大电路可看出，无反馈基本放大电路的输入电阻 $r_i=\frac{\dot{V}_{be}}{\dot{I}_b}$，引入负反馈后的输入电阻 $r_{if}=\frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_b}$，因为 $\dot{V}_i=\dot{V}_{be}+\dot{V}_f>\dot{V}_{be}$，所以：$r_{if}>r_i$，即串联负反馈使输入电阻增大。

由图 1.1.8-42 a)、c) 所示并联负反馈放大电路可看出，无反馈基本放大电路的输入电阻 $r_i=\frac{\dot{V}_{be}}{\dot{I}_b}$，引入负反馈后的输入电阻 $r_{if}=\frac{\dot{V}_{be}}{\dot{I}_b}$，因为 $\dot{I}_i=\dot{I}_b+\dot{I}_f>\dot{I}_b$，所以；$r_{if}<r_i$，即并联负反馈使输入电阻减小。

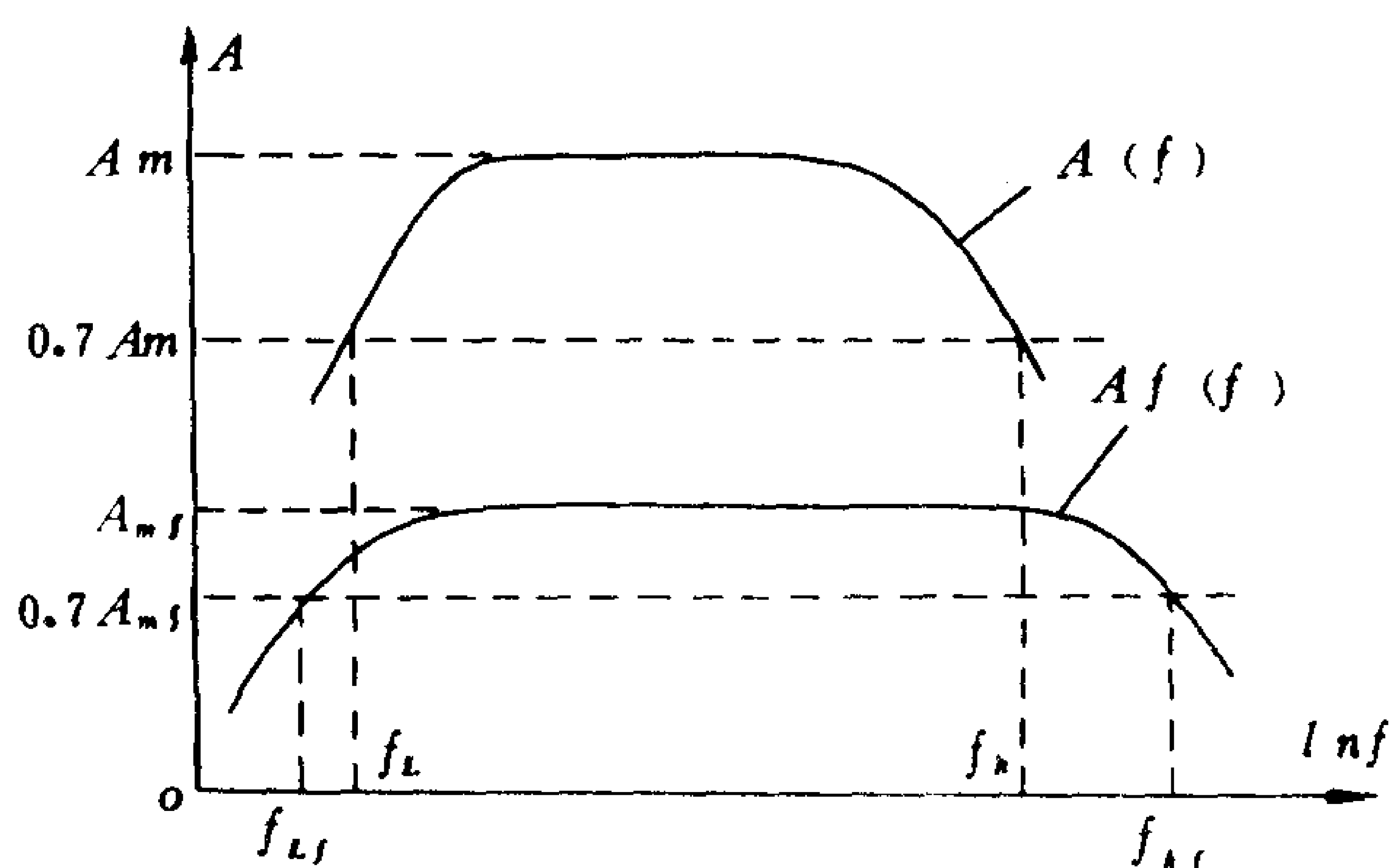


图 1.1.8-44 负反馈展宽通频带

3.2.6 负反馈对放大器输出电阻的影响

放大器引入负反馈后，使输出电阻增大还是减小，与从放大器输出端取得反馈信号的量有关：电压负反馈具有稳定输出电压，减小其动态内阻的作用，所以电压负反馈能使输出电阻减小；电流负反馈具有稳定输出电流，增加其动态内阻的作用，所以电流负反馈能使输出电阻增大。

3.3 反馈类型的判别

反馈的正负判别可利用各点电位的瞬时极性：瞬时极性为正，表示电位在升高，负的表示降低。共射极放大电路同一管子基极的瞬时极性与其发射极（接有射极电阻 R_E，且未被射极电容 C_E 旁路时）瞬时极性相同，与其集电极瞬时极性相反。设 T_1 基极瞬时极性为正，则两级直接耦合放大电路各点电位的瞬时极性如图 1.1.8-45。再根据经反馈电路反馈到输入端的反馈信号瞬时极性与假设输入信号的瞬时极性是否相同来判断反馈的正、负。相同，属

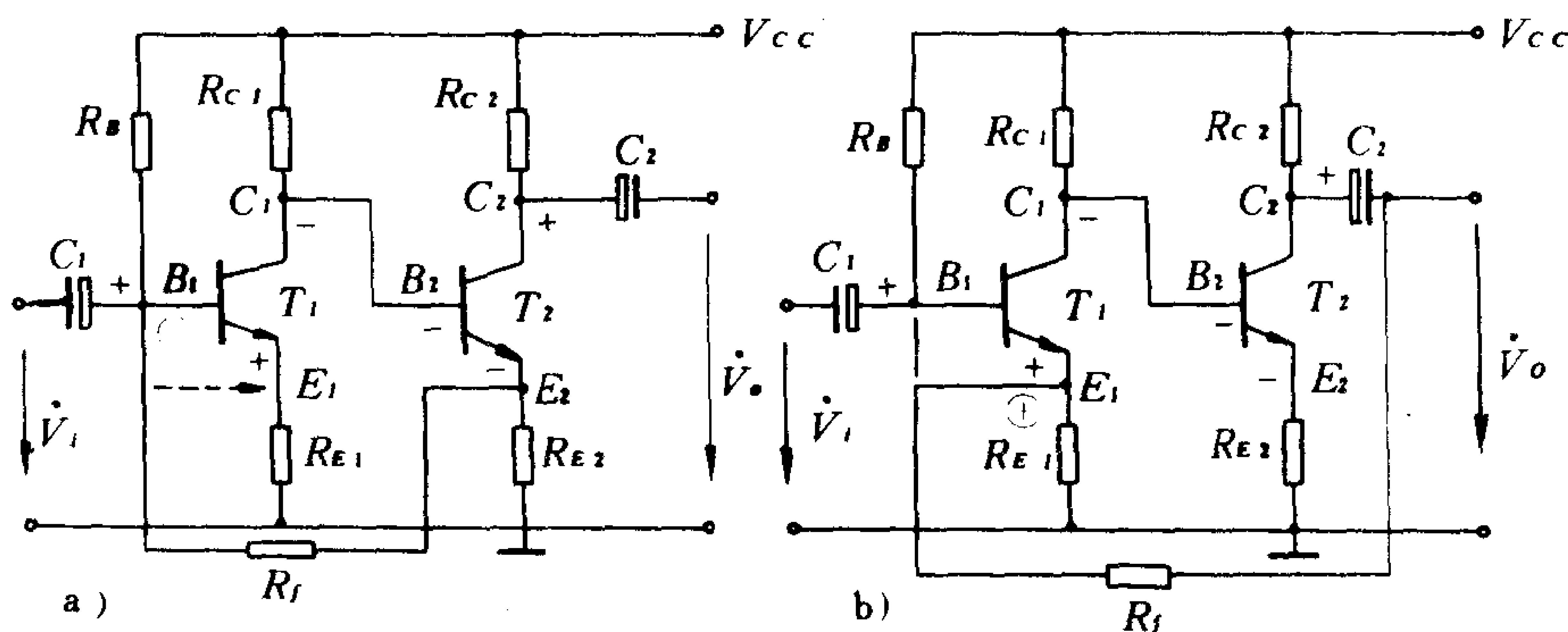


图 1.1.8-45 反馈类型的判别

a)电流并联负反馈；b)电压串联负反馈

正反馈；相反，属负反馈。图 1.1.8-45 中a)，反馈信号与 I_{e2} 成正比，经 R_f 反馈到 B_1点，与输入信号 $\dot{V}_i$ 并联，且与 B_1 点假定的"+"极性相反，故图 a) 为电流并联负反馈放大电路。如果将 R_f 接到 E_1 点（图中 a) 虚线所示)，将 T_1 射极电位拉低，增加了 V_{be1}，则为电流串联正反馈。图中 b) 反馈信号与 $\dot{V}_C$ 成正比，经 R_f 反馈到 E_1 点，与输入信号 $\dot{V}_i$ 串联，且与 E_1 点假定的"+"极性相同，将 T_1 射极电位抬高，削弱了 V_{be1}，所以图中 b) 为电压串联负反馈。如果将 R_f 接到 B_1 点（b 图虚线所示)，则使 V_{be1} 增强，为电压并联正反馈。总之，若 R_f 右端接于后一级管子 T_2 的发射极（有射极电阻 R_E 时)，即为电流反馈；接于后一级管子 T_2 的集电极（有集极电阻 R_C 时)，即为电压反馈；R_f 左端接于前一级管子 T_1 的发射极（有射极电阻 R_E 时)，为串联反馈；接于基极的为并联反馈。

3.4 反馈放大电路动态参数的分析

反馈放大电路的种类和形式很多，不论哪一种形式，只要属于负反馈，在稳定增益，减小非线性失真，抑制内部噪声和展宽通频带方面，其效果是类似的。现仅就几种常见的负反馈放大电路的增益、输入电阻、输出电阻作分析。

3.4.1 电流串联负反馈放大电路

将图 1.1.8-28 的射极旁路电容 C_E 去掉就构成单级电流串联负反馈放大电路，重画于图

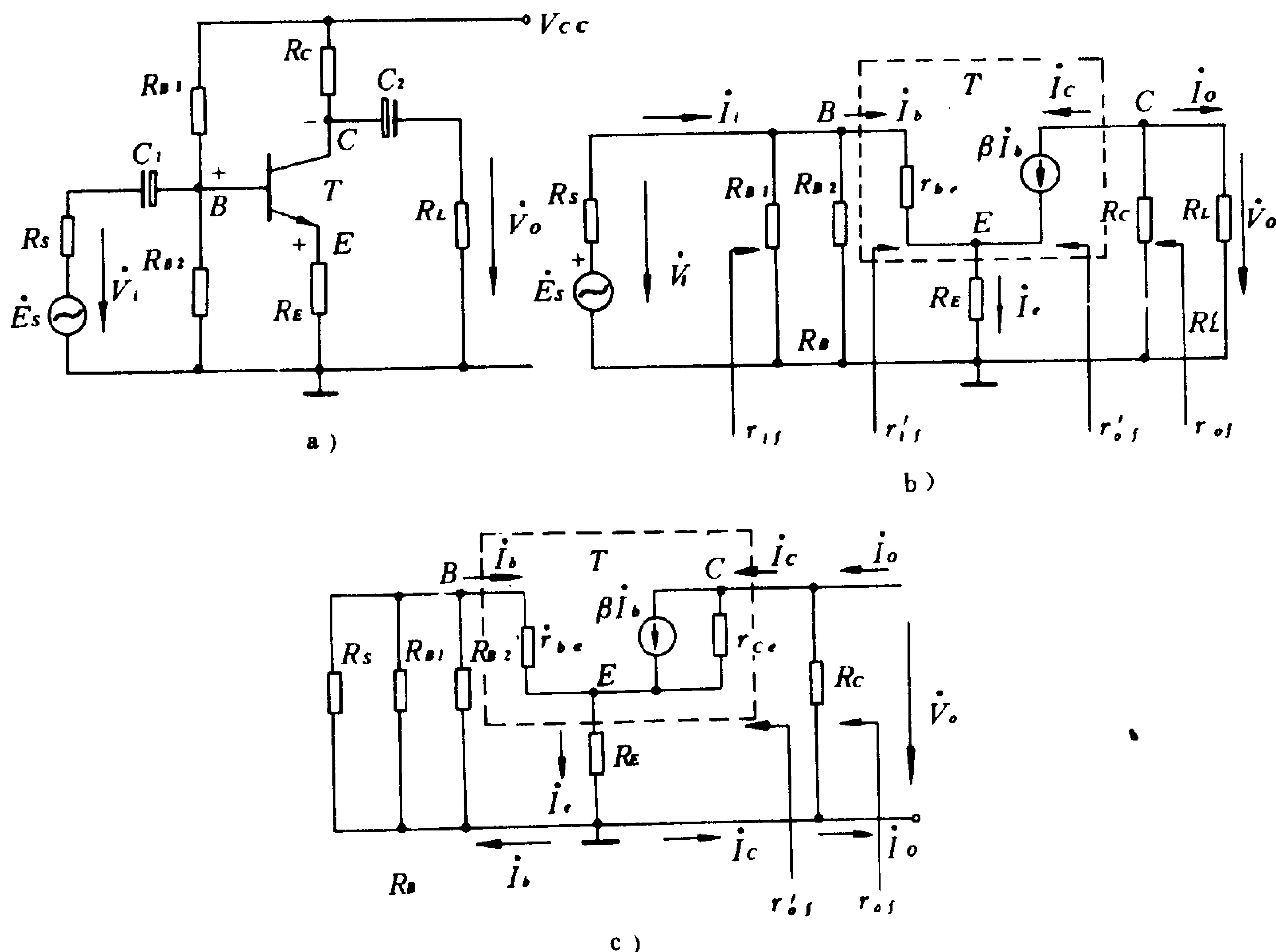


图 1.1.8-46 电流串联负反馈放大电路

a)基本电路；b)微变等效电路；c)求 r_{of} 的电路

1.1.8-46 a)。静态值的计算见 2.3.2，图b)是其微变等效电路。

1)电压增益 $\dot{A}_{vf}$ 由图 1.1.8-46 b)的输入回路有

$$\dot{V}_i=\dot{I}_b r_{be}+\dot{I}_e R_E=\dot{I}_b r_{be}+(1+\beta)\dot{I}_b R_E=\dot{I}_b[r_{be}+(1+\beta)R_E] \quad (1.1.8\text{-}18)$$

由输出回路有

$$\dot{V}_o=-\beta\dot{I}_b R_L' \quad (1.1.8\text{-}19)$$

故闭环电压增益为:

$$\dot{A}_{vf}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=-\frac{\beta R_L'}{r_{be}+(1+\beta)R_E} \quad (1.1.8\text{-}20)$$

$$R_L'=\frac{R_c\cdot R_L}{R_c+R_L} \quad (1.1.8\text{-}21)$$

2)输入电阻 r_{if} 由式(1.1.8-18),在不计及 $R_{B1}/\!/R_{B2}$ 的分流效应时,

$$r_{if}'=\frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_b}=r_{be}+(1+\beta)R_E \quad (1.1.8\text{-}22)$$

考虑 R_B 的分流效应后,

$$r_{if}=R_{B1}/\!/R_{B2}/\!/r_{if}' \quad (1.1.8\text{-}23)$$

3)输出电阻 r_{of} 将图b)中的信号源 $\dot{E}s$ 短接,在输出端加激励 $\dot{V}_o$,如图1.1.8-46 c)。就输入、输出回路分别列出回路电压方程:

$$\begin{cases}\dot{I}_b(R_B+r_{be})+\dot{I}_e R_E=0 \quad (R_B=R_s/\!/R_{B1}/\!/R_{B2}) & (1.1.8\text{-}24)\\ (\dot{I}_c-\beta\dot{I}_b)r_{ce}+\dot{I}_e R_E=\dot{V}_o & (1.1.8\text{-}25)\end{cases}$$

由式(1.1.8-24) $\dot{I}_b(R_B+r_{be})+(\dot{I}_b+\dot{I}_c)R_E=\dot{I}_b(R_B+R_E+r_{be})+\dot{I}_c R_E=0$

$$\dot{I}_b=\frac{-R_E}{R_B+R_E+r_{be}}\dot{I}_c \quad (1.1.8\text{-}26)$$

由以上两式得: $\dot{V}_o=(\dot{I}_c+\beta\frac{R_E\dot{I}_c}{R_B+R_E+r_{be}})r_{ce}+(\dot{I}_c-\frac{R_E\dot{I}_c}{R_B+R_E+r_{be}})R_E$

$$=\dot{I}_c[r_{ce}+R_E+\frac{R_E}{R_B+R_E+r_{be}}(\beta r_{ce}-R_E) \quad (1.1.8\text{-}27)$$

$$r_{of}'=\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o}=r_{ce}+R_E+\frac{R_E}{R_B+R_E+r_{be}}(\beta r_{ce}-R_E),\ (\text{通常 } R_E\ll r_{ce})$$

$$\approx r_{ce}(1+\frac{\beta R_E}{R_B+R_E+r_{be}}) \quad (1.1.8\text{-}28)$$

考虑 R_c 的分流效应后,应为

$$r_{of}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o}=r_{of}'/\!/R_c\approx R_c \quad (1.1.8\text{-}29)$$

这种电流串联负反馈使输出电阻增加不多。

4)电流增益 A_{If} 和功率增益 A_{pf} 不计及输出(输入)回路 $R_c(R_B=R_{B1}/\!/R_{B2})$的分流损耗,

$A_{If}'=-\frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b}=-\beta$,考虑 R_c 和R_B 的分流损耗后, $\dot{A}_{If}=\frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}=-\beta\frac{r_{if}'\cdot R_L'}{r_{if}\cdot R_L}$,

故功率增益为

$$A_{pf}=A_{vf}\cdot A_{If}=\beta^2\ (R_L')^2\frac{r_{if}'}{[r_{be}+(1+\beta)R_E]r_{if}R_L} \quad (1.1.8\text{-}30)$$

3.4.2 电压并联负反馈放大电路

图1.1.8-47 a)为这类放大电路之一。它既能实现直流负反馈,以稳定静态工作点,又能实现交流电压并联负反馈,以改进放大器的动态性能。静态值的计算可根据图a)的直流通

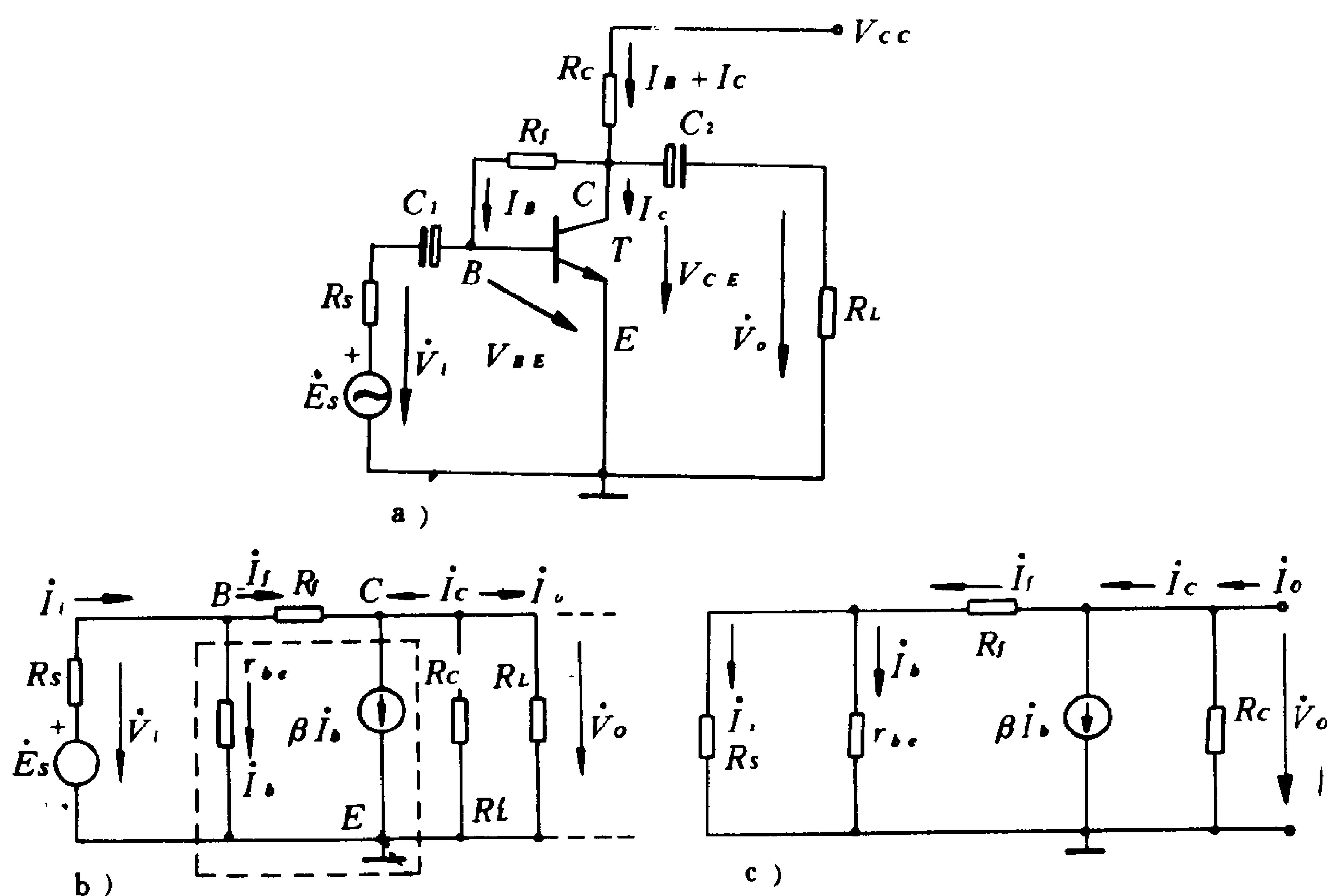


图 1.1.8-47　电压并联负反馈放大电路

a)基本电路；b)微变等效电路；c)求 r_{of} 的电路

道进行。通常 $V_{CE} \gg V_{BE}=0.6V$，　$V_{CE}=V_{CC}-(1+\bar{\beta})I_B R_c$，　$I_B=\dfrac{V_{CB}}{R_f}\approx\dfrac{V_{CE}}{R_f}$，于是 $V_{CE}=V_{CC}-(1+\bar{\beta})\dfrac{R_C}{R_f}V_{CE}$，经变换后 $V_{CE}=\dfrac{V_{CC}}{1+(1+\bar{\beta})R_c/R_f}$，　$I_B\approx V_{CE}/R_f$，　$I_c=\bar{\beta}I_B$。

1)电压增益 $\dot{A}_{vvf}$　由图 1.1.8-47 b)，应用节点电位法，可求得两个节点电位 $\dot{V}_B=\dot{V}_i$，$\dot{V}_c=\dot{V}_o$，于是

$$\dot{A}_{vvf}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=\frac{\beta g_{be}-G_f}{G_L'+G_f} \tag{1.1.8-31}$$

式中 g_{be}、G_f 和 G_L' 分别是 r_{be}、R_f 和 $R_L'=R_c /\!/ R_L$ 的倒数。如果考虑到信号源的内阻 R_s，则为

$$\dot{A}_{vsf}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{E}_s}=\frac{\dot{V}_i}{\dot{E}_s}\cdot\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=\dot{A}_{vvf}\frac{r_{if}}{R_s+r_{if}} \tag{1.1.8-32}$$

2)输入电阻 r_{if}　由解得的节点电位 $\dot{V}_B$ 和 $\dot{E}_s$ 的关系中加以推导和整理后有

$$r_{if}=\frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}=\frac{\dot{V}_B}{\dfrac{\dot{E}_s-\dot{V}_B}{R_s}}=\frac{R_s}{\dot{E}_s/\dot{V}_B-1}=\frac{1}{g_{be}+G_f+|\dot{A}_{vvf}|G_f}=\frac{1+|\dot{A}_{vvf}|}{R_f} /\!/ r_{be} \tag{1.1.8-33}$$

3)输出电阻 r_{of}　将图 1.1.8-47 b) 中的信号源 $\dot{E}_s$ 短接，在输出端加激励 $\dot{V}_o$，如图c)。

$$r_{of}'=\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_c}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_f+\beta\dot{I}_b}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_f+\beta\dot{I}_f\dfrac{R_s}{R_s+r_{be}}}=\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_f(1+\beta\dfrac{R_s}{R_s+r_{be}})}$$

$$=\frac{\dot{V}_o}{\dfrac{\dot{V}_o}{R_f+R_s /\!/ r_{be}}(1+\dfrac{\beta R_s}{R_s+r_{be}})}=\frac{R_f+R_s /\!/ r_{be}}{1+\beta\dfrac{R_s /\!/ r_{be}}{r_{be}}} \tag{1.1.8-34}$$

考虑 R_c 的分流效应后，应为

$$r_{of}=\frac{\dot{V}_O}{\dot{I}_O}=r'_{of}/\!/R_c \quad (1.1.8\text{-}35)$$

4）电流增益 $\dot{A}_{If}$ 和功率增益 A_{pf}

$$\dot{A}_{If}=\frac{\dot{I}_O}{\dot{I}_i}=\frac{\dot{V}_O/R_L}{\dot{V}_i/r_{if}}=\dot{A}_{vvf}\frac{r_{if}}{R_L} \quad (1.1.8\text{-}36)$$

$$A_{pf}=A_{If}\cdot A_{vvf}=A_{vvf}^2\frac{r_{if}}{R_L}=\left(\frac{\beta g_{be}-G_f}{G_L+G_f}\right)^2\frac{r_{if}}{R_L} \quad (1.1.8\text{-}37)$$

3.4.3 电流并联、电压串联负反馈放大电路

图1.1.8-48 a)、b) 分别是这两种负反馈放大电路，c)、d) 分别是它们的等效线性电路。根据图示瞬时极性可知，它们均属于负反馈。图a) 为两级直接耦合放大电路。每一级都有用以稳定静态工作点的射极电阻 R_{E1}、R_{E2}，而且第一级的基极偏置电源是取自第二级的射极电位 V_{E2}，经电阻 R_f、R_B 分压加到第一级的基极。其静态值的计算：

第一级静态值：$I_{E1}=\left(\frac{R_B V_{E2}}{R_f+R_B}-V_{BE1}\right)/R_{E1}$，$I_{C1}+I_{B2}=\frac{V_{CC}-V_{BE2}-V_{E2}}{R_{C1}}$，忽略 I_{B2}、$I_{E1}\approx I_{C1}$，则 $\left(\frac{R_B V_{E2}}{R_f+R_B}-V_{BE1}\right)/R_{E1}\approx(V_{CC}-V_{BE2}-V_{E2})/R_{C1}$，$V_{E2}=\left(\frac{V_{CC}-V_{BE2}}{R_{C1}}+\frac{V_{BE1}}{R_{E1}}\right)\Big/\left(\frac{R_B}{(R_f+R_B)R_{E1}}+\frac{1}{R_C}\right)$。

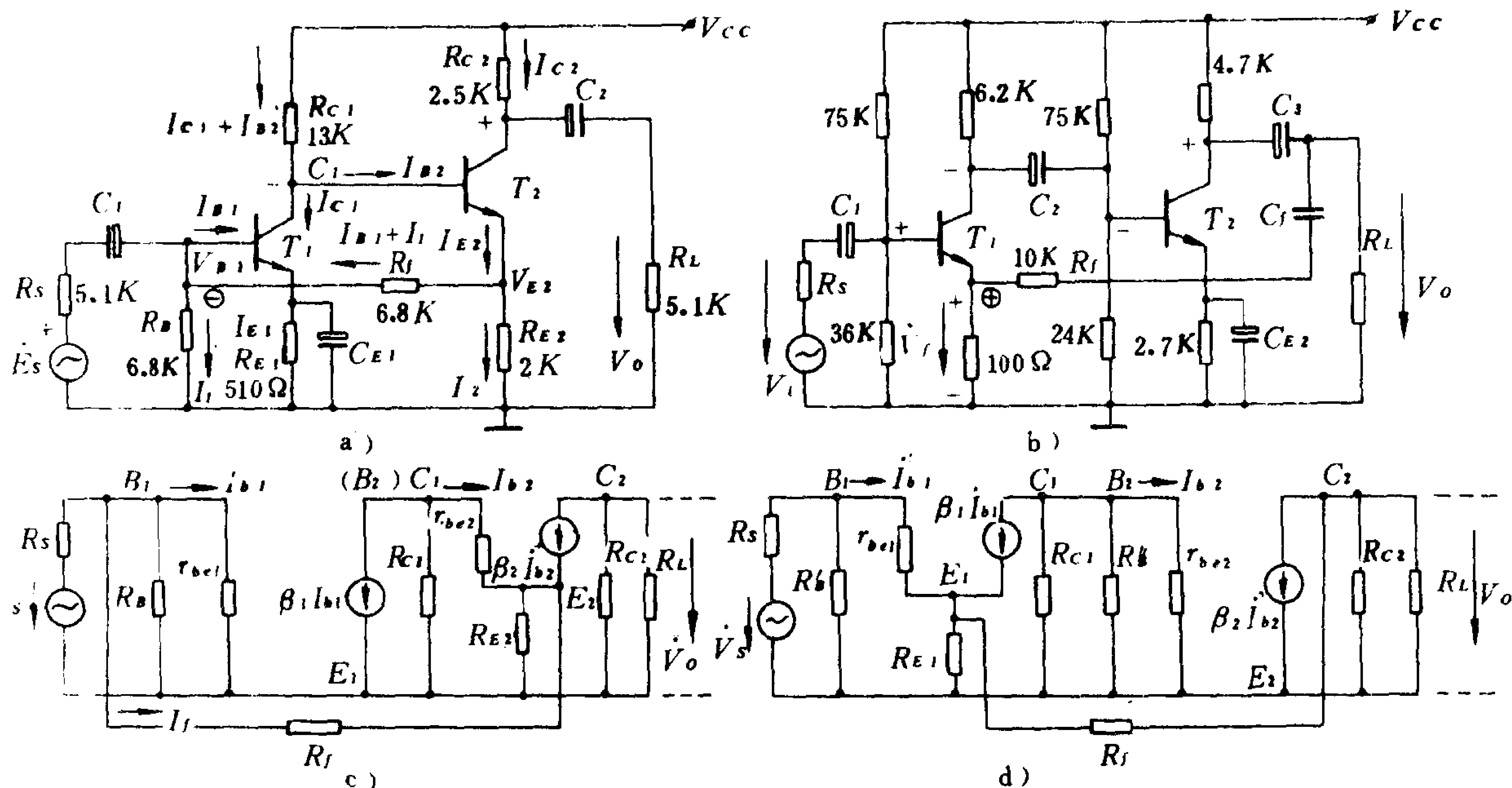


图 1.1.8-48 电流并联、电压串联负反馈放大电路

a)、c) 电流并联负反馈；b)、d) 电压串联负反馈

取 V_{BE1}、V_{BE2} 都为 0.7V，即可求得 V_{E2}、$I_{E1} \approx I_{C1}$，$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1}$，$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C1}(R_{C1} + R_{E1})$。

第二级静态值：$I_1 = \frac{V_{B1}}{R_B} = \frac{V_{E2}}{R_f + R_B}$（忽略了 I_{B1}），$I_2 = \frac{V_{E2}}{R_{E2}}$，$I_{E2} = I_{B1} + I_1 + I_2 \approx I_{C2}$，$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{1+\beta_2}$，$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2}(R_{C2} + R_{E2})$。

图b）为两级阻容耦合放大器，由于 R_f 也被 C_f 隔直，所以前后两级的静态值互不相干。它们都是分压式带直流负反馈以稳定其静态工作点的偏置电路。其静态值的计算方法与图1.1.8-28相同。

对于像图 1.1.8-48 a)、b) 所示两级耦合放大器的动态参数的分析方法，原则上与图1.1.8-47相同，即对它们的等效线性电路 c)、d)，应用节点电压法解出四个节点电位：$\dot{V}_{B1} = \dot{V}_i$，$\dot{V}_{C1} = \dot{V}_{B2}$，$\dot{V}_{C2} = \dot{V}_o$，$\dot{V}_{E2}$（图c）或 $\dot{V}_{E1}$（图d），即可求得。此处从略。

3.5 共集电极放大电路——射极输出器

图 1.1.8-49 a) 所示共集电极放大电路为全部电压串联负反馈放大电路。其静态值的估算：

$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \approx I_B R_B + (1+\bar{\beta}) I_B R_E$；$I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_B + (1+\bar{\beta}) R_E}$，$I_E = (1+\bar{\beta}) I_B$；$V_{CE} = V_{CC} - I_E R_E = \frac{R_B V_{CC}}{R_B + (1+\bar{\beta}) R_E}$。

它的等效线性电路如图b)、c)。由图c) 可导出其动态参数（$\dot{A}_{vf}$、$\dot{A}_{If}$、r_{if}）。已知 $\dot{V}_O = \dot{I}_e R_L' = (1+\beta)\dot{I}_b R_L'$，$\dot{V}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_L' = \dot{I}_b[r_{be} + (1+\beta) R_L']$，所以：

电压增益 $$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_O}{\dot{V}_i} = \frac{(1+\beta) R_L'}{r_{be} + (1+\beta) R_L'} \quad (1.1.8\text{-}38)$$

通常 $r_{be} \ll \beta R_L'$ 则有 $$\dot{A}_{vf} \lesssim 1 \quad (1.1.8\text{-}39)$$

输入电阻 $$r_{if}' = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1+\beta) R_L' \approx \beta R_L' \quad (1.1.8\text{-}40)$$

考虑 R_B 的分流效应后

$$r_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_{RB} + \dot{I}_b} = R_B /\!/ r_{if}' \quad (1.1.8\text{-}41)$$

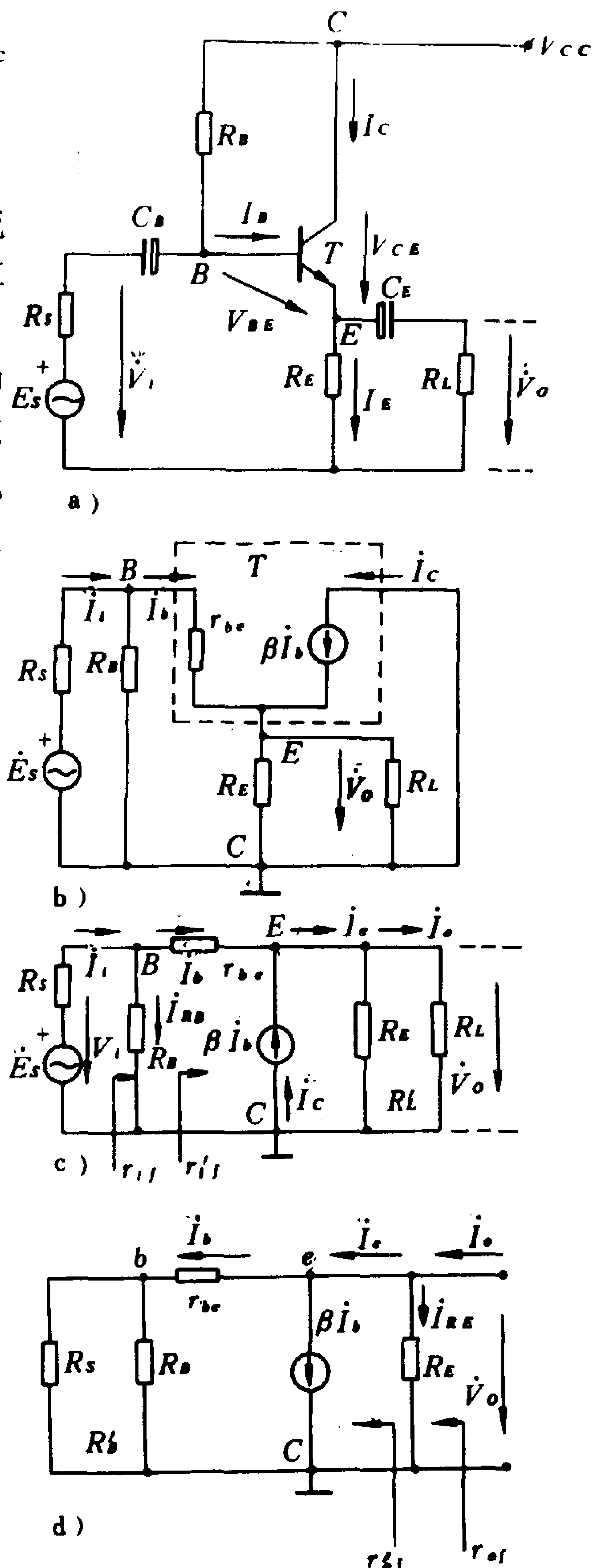


图 1.1.8-49 共集电极放大电路

a)基本电路；b)、c)等效电路的两种画法；d)求 r_{of} 的电路

电流增益 $\dot{A}_{\mathrm{If}}=\dfrac{\dot{I}_{\mathrm{O}}}{\dot{I}_{\mathrm{i}}}=\dfrac{\dot{I}_{\mathrm{e}}}{\dot{I}_{\mathrm{b}}}\cdot\dfrac{\dfrac{R_{\mathrm{E}}}{R_{\mathrm{E}}+R_{\mathrm{L}}}}{\dfrac{R_{\mathrm{B}}+r_{\mathrm{if}}'}{R_{\mathrm{B}}}}=(1+\beta)\dfrac{R_{\mathrm{E}}}{R_{\mathrm{E}}+R_{\mathrm{L}}}\cdot\dfrac{R_{\mathrm{B}}}{R_{\mathrm{B}}+r_{\mathrm{if}}'}$ (1.1.8-42)

功率增益（不计及 R_{B}、R_{E}的分流效应时）$A_{\mathrm{pf}}=A_{\mathrm{vf}}\cdot A_{\mathrm{If}}\approx A_{\mathrm{If}}\approx 1+\beta$ (1.1.8-43)

输出电阻 r_{of} 的分析，如图 1.1.8-49 d) 所示，即将信号源短接，在输出端（且 R_{L} 应开路）加激励 $\dot{V}_{\mathrm{O}}$，先不考虑 R_{E} 的分流效应，$\left(\dot{I}_{\mathrm{e}}=(1+\beta)\dot{I}_{\mathrm{b}}=(1+\beta)\dfrac{\dot{V}_{\mathrm{O}}}{r_{\mathrm{be}}+R_{\mathrm{B}}/\!/R_{\mathrm{S}}}\right)$

$$r_{\mathrm{of}}'=\frac{\dot{V}_{\mathrm{O}}}{\dot{I}_{\mathrm{e}}}=\frac{r_{\mathrm{be}}+R_{\mathrm{B}}/\!/R_{\mathrm{S}}}{1+\beta} \tag{1.1.8-44}$$

如果信号源内阻 R_{S} 甚小，$r_{\mathrm{of}}'\approx\dfrac{r_{\mathrm{be}}}{\beta}$。

考虑 R_{E} 的分流效应后

$$r_{\mathrm{of}}=\frac{\dot{V}_{\mathrm{O}}}{\dot{I}_{\mathrm{O}}}=\frac{\dot{V}_{\mathrm{O}}}{\dot{I}_{\mathrm{RE}}+\dot{I}_{\mathrm{e}}}=R_{\mathrm{E}}/\!/r_{\mathrm{of}}' \tag{1.1.8-45}$$

3.6 共基极放大电路

图 1.1.8-50 a) 为共基极放大电路，其直流通道与具有分压式偏置电路带直流负反馈稳定静态工作点的图1.1.8-28相同，其静态值的计算方法也与之相同。由图b) 所示等效线性电路，可求得其动态参数（A_{V}、A_{I}、r_{i}）。

$$\dot{V}_{\mathrm{O}}=-\dot{I}_{\mathrm{c}}R_{\mathrm{L}}'=-\beta\dot{I}_{\mathrm{b}}R_{\mathrm{L}}',\quad \dot{V}_{\mathrm{i}}=-\dot{I}_{\mathrm{b}}r_{\mathrm{be}}$$

电压增益 $A_{\mathrm{V}}=\dfrac{\dot{V}_{\mathrm{O}}}{\dot{V}_{\mathrm{i}}}=\beta\dfrac{R_{\mathrm{L}}'}{r_{\mathrm{be}}}$，大小与共射极放大电路的相等，正号表示 $\dot{V}_{\mathrm{O}}$ 与 $\dot{V}_{\mathrm{i}}$ 同相位。

输入电阻 $r_{\mathrm{i}}'=\dfrac{\dot{V}_{\mathrm{i}}}{-\dot{I}_{\mathrm{e}}}=\dfrac{-\dot{I}_{\mathrm{b}}r_{\mathrm{be}}}{-(1+\beta)\dot{I}_{\mathrm{b}}}=\dfrac{r_{\mathrm{be}}}{1+\beta}$ (1.1.8-46)

考虑 R_{E} 的分流效应后

$$r_{\mathrm{i}}=\frac{\dot{V}_{\mathrm{i}}}{\dot{I}_{\mathrm{i}}}=\frac{\dot{V}_{\mathrm{i}}}{\dot{I}_{\mathrm{RE}}-\dot{I}_{\mathrm{e}}}=\frac{\dot{V}_{\mathrm{i}}}{\dfrac{\dot{V}_{\mathrm{i}}}{R_{\mathrm{E}}}+\dfrac{\dot{V}_{\mathrm{i}}}{r_{\mathrm{i}}'}}=R_{\mathrm{E}}/\!/r_{\mathrm{i}}' \tag{1.1.8-47}$$

电流增益 $\dot{A}_{\mathrm{I}}=\dfrac{\dot{I}_{\mathrm{O}}}{\dot{I}_{\mathrm{i}}}=\left(\dfrac{\dot{I}_{\mathrm{c}}}{\dot{I}_{\mathrm{e}}}\right)\dfrac{\dfrac{R_{\mathrm{c}}}{R_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{L}}}}{\dfrac{R_{\mathrm{B}}+r_{\mathrm{i}}'}{R_{\mathrm{E}}}}=\dfrac{\beta}{1+\beta}\cdot\dfrac{R_{\mathrm{c}}}{R_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{L}}}\cdot\dfrac{R_{\mathrm{E}}}{R_{\mathrm{E}}+r_{\mathrm{i}}'}$ (1.1.8-48)

如果不计及 R_{E}、R_{c} 的分流效应

$$A_{\mathrm{I}}'\approx 1 \tag{1.1.8-49}$$

功率增益 $A_{\mathrm{P}}=A_{\mathrm{V}}\cdot A_{\mathrm{I}}'\approx\beta\dfrac{R_{\mathrm{L}}'}{r_{\mathrm{be}}}$ (1.1.8-50)

输出电阻 r_{o} 的分析，如图 1.1.8-50 c) 所示，即将信号源短接，在输出端（且 R_{L} 应开路）加激励 $\dot{V}_{\mathrm{o}}$，先不考虑 R_{c} 的分流效应

$$r_{\mathrm{o}}'=\frac{\dot{V}_{\mathrm{O}}}{\dot{I}_{\mathrm{c}}} \tag{1.1.8-51}$$

就 c-e-b 回路列电压方程：$(\dot{I}_{\mathrm{c}}-\beta\dot{I}_{\mathrm{b}})r_{\mathrm{ce}}+\dot{I}_{\mathrm{c}}r_{\mathrm{be}}'=\dot{V}_{o}$，由图示电流正方向，$\dot{I}_{\mathrm{b}}=-\dot{I}_{\mathrm{c}}\dfrac{R_{\mathrm{E}}'}{R_{\mathrm{E}}'+r_{\mathrm{be}}}$，

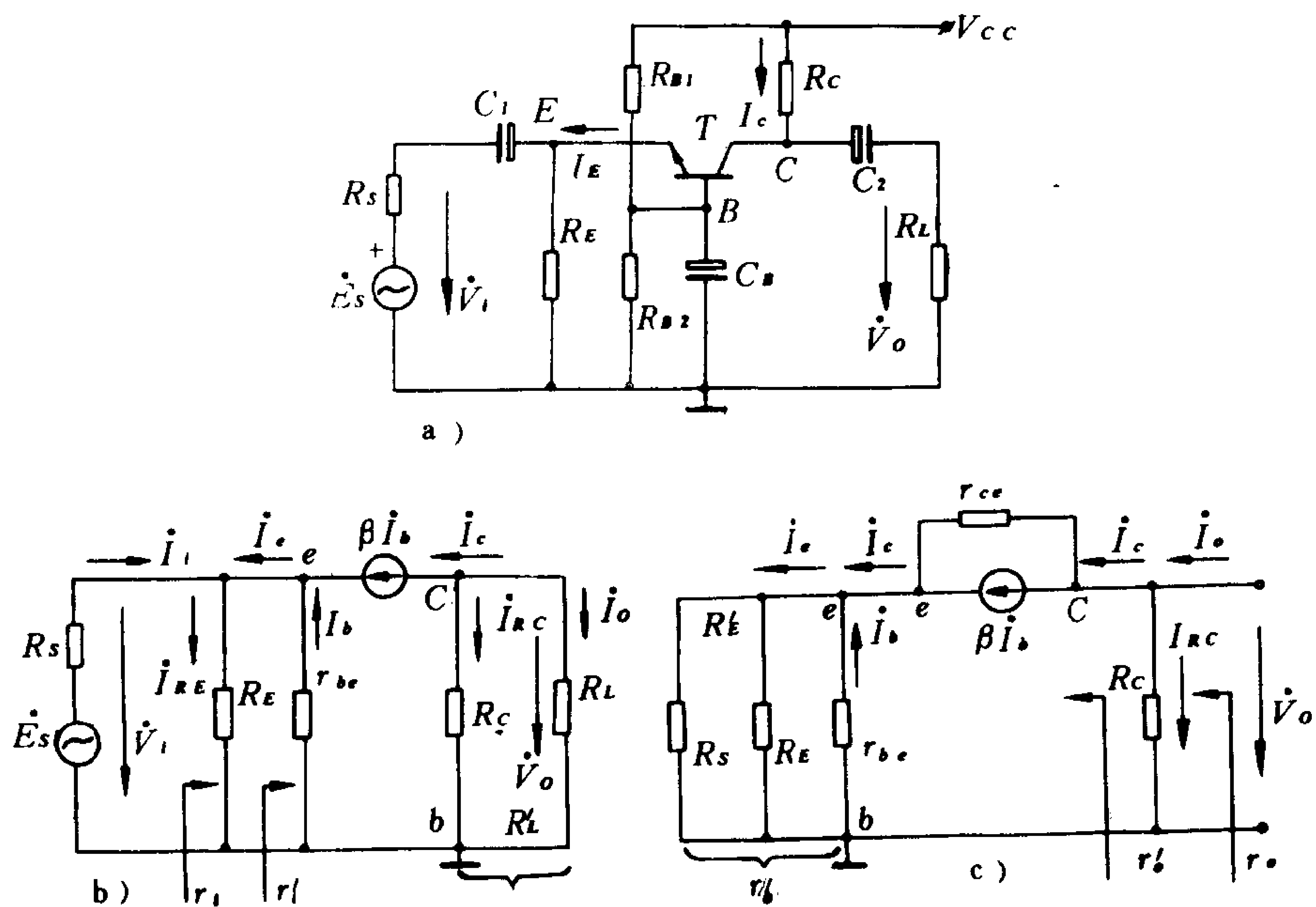


图 1.1.8-50　共基极放大电路

a)基本电路；b)等效电路；c)求 r_o 的电路

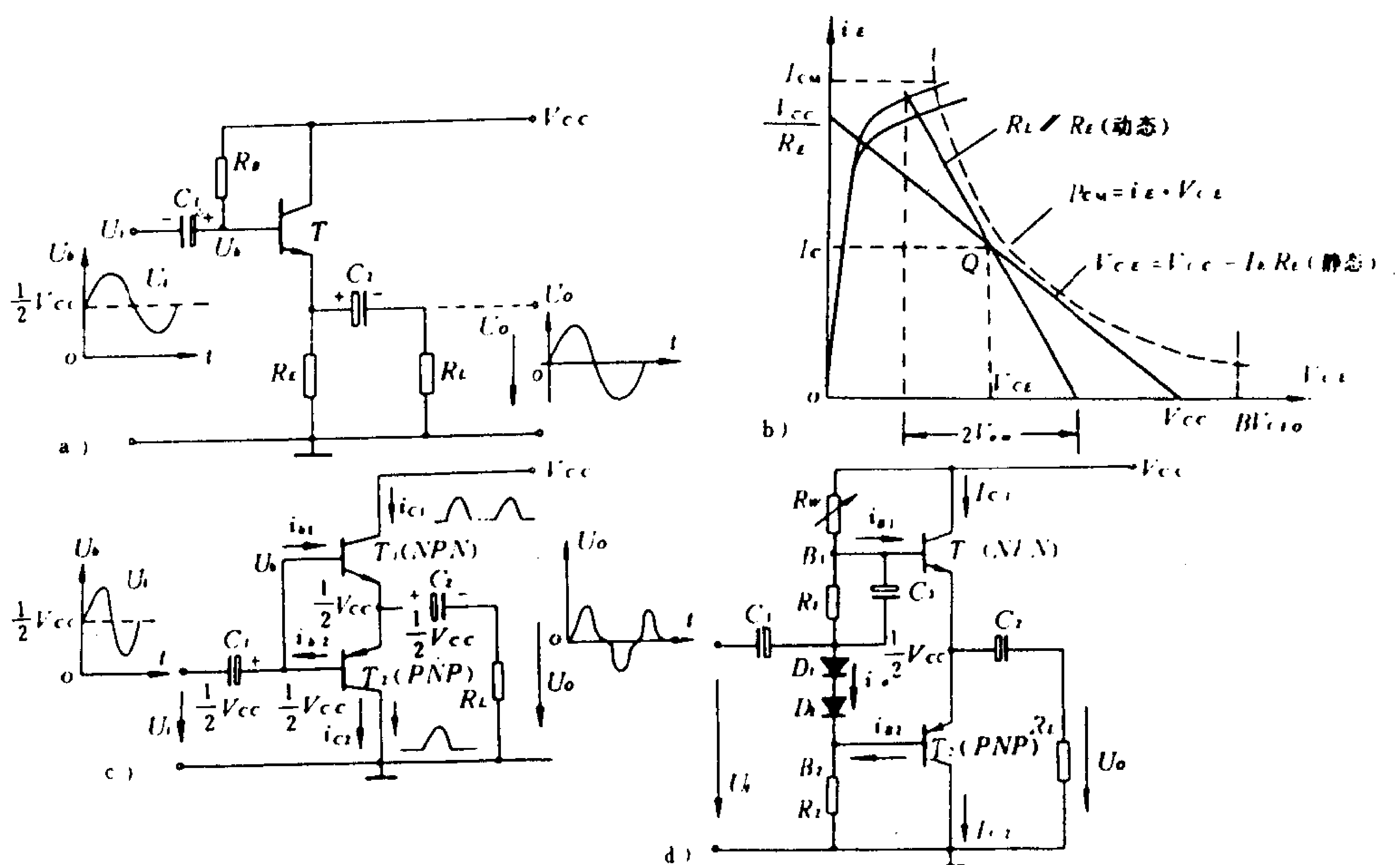


图 1.1.8-51　射极跟随器的几种形式

a)甲类放大电路；b)甲类功放图解；c)乙类放大电路；d)甲乙类放大电路

代入上式得

$$\dot{I}_c(r_{ce}+\beta\frac{R_e'\cdot r_{ce}}{R_E'+r_{be}}+r_{be}')=\dot{V}_o \tag{1.1.8-52}$$

输出电阻 $r_o'=\dfrac{\dot{V}_o}{\dot{I}_c}=r_{be}'+(1+\beta\dfrac{R_E'}{R_E'+r_{be}})r_{ce}$ (1.1.8-53)

式中，$R_E'=R_S /\!/ R_E$，$r_{be}'=R_F' /\!/ r_{be}$，如信号源内阻 R_S 甚小。R_E'，$r_{be}'\approx 0$，则 $r_o'\approx r_{ce}$，考虑 R_c的分流效应后

$$r_o=R_c /\!/ r_o'\approx R_c \tag{1.1.8-54}$$

应该指出，共基极放大电路本不属于反馈放大电路，放在本节只是为了将三种接法的放大电路作一比较，见表 1.1.8-1。

表 1.1.8-1　**放大电路三种基本接法的比较**

	共射极接法(固定偏置)	共集电极接法	共基极接法
电路形式	①	②	③
静态值	$I_B=\dfrac{V_{cc}-0.6}{R_B}\approx\dfrac{V_{cc}}{R_B}$ $I_C=\bar{\beta}I_B$ $V_{CE}=V_{cc}-I_cR_c$	$I_B=\dfrac{V_{cc}}{R_B+(1+\beta)R_E}$ $I_C=\bar{\beta}I_B$ $V_{CE}=V_{cc}-I_cR_E$	$V_B=\dfrac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{cc}$ $I_c\approx I_E=\dfrac{V_B}{R_E}$ $I_B=I_c/\bar{\beta}$ $V_{CB}\approx V_{CE}\approx V_{cc}-I_c(R_c+R_E)$
	共射极接法(固定偏置)	共集电极接法	共基极接法
微变等效电路	④	⑤	⑥
A_v	$\dfrac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=-\dfrac{\beta R_L'}{r_{be}}, R_L'=R_c /\!/ R_L$	$\dfrac{(1+\beta)R_L'}{r_{be}+(1+\beta)R_L'}$, $R_L'=R_E /\!/ R_L$	$\dfrac{\beta R_L'}{r_{be}}$ $R_L'=R_C /\!/ R_L$
A_I	$\dfrac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}=-\beta\dfrac{R_C}{R_C+R_L}\cdot\dfrac{R_B}{R_B+r_{be}}$	$(1+\beta)\dfrac{R_E}{R_E+R_L}\cdot\dfrac{R_B}{R_B+r_{if}'}$	$\dfrac{\beta}{1+\beta}\cdot\dfrac{R_C}{R_C+R_L}\cdot\dfrac{R_E}{R_E+r_i'}$
A_p	$\dfrac{V_oI_o}{V_iI_i}=A_IA_v$	$A_{vf}\cdot A_{If}\approx A_{If}$	$A_v\cdot A_I\approx\beta\dfrac{R_L'}{r_{be}}$
r_i'	r_{be}	$r_{be}+(1+\beta)R_L'$	$\dfrac{r_{be}}{1+\beta}\approx r_{be}/\beta$

续上表

	共射极接法(固定偏置)	共集电极接法	共基极接法
r_i	$R_B /\!/ r_{be}$	$R_B /\!/ [r_{be}+(1+\beta)R_L']$	$R_E /\!/ \frac{r_{be}}{1+\beta}$
r_o'	r_{ce}	$\frac{r_{be}+R_B /\!/ R_s}{1+\beta}$	$r_{be}'+(1+\beta\frac{R_E'}{R_E'-r_{be}})r_{ce}$, $R_E'=R_E /\!/ R_s$ $r_{be}'=R_E' /\!/ r_{be}$
r_0	$R_C /\!/ r_{ce}\approx R_C$	$R_E /\!/ \frac{r_{be}+R_B /\!/ R_s}{1+\beta}$	$r_o' /\!/ R_C \approx R_C$
用途	多级放大器的中间级	阻抗变换 输入级,输出级,缓冲级	高频或宽频带放大电路及恒流源电路

3.7 无变压器耦合的功率放大器

变压器耦合的缺点是体积大，笨重，而且低频高频特性差。但功率放大器要求输出电阻小，以增加带负载能力，而射极输出器具有输出电阻小的特点，所以无变压器耦合的功率放大器可以用共集电极放大电路实现，图 1.1.8-51 a）为甲类功率放大器，静态工作点和负载线的选取原则与变压器耦合功率放大器的类似，即要求晶体管工作于极限参数边缘。图b)是负载线、静态工作点 Q 与晶体管极限参数（I_{CM}、BV_{CEO}、P_{CM}） 的关系。但甲类的缺点就是效率太低，为此，采用了图c)所示的乙类功率放大器。如果两管特性一致，静态时两管射极、基极电位，两个电容器 C_1、C_2 上的电压都是 $\frac{V_{CC}}{2}$。而且由于电容量足够大，即使在动态情况下，电容电压也基本上维持 $\frac{V_{CC}}{2}$不变。在输入信号 v_i 为正半周（即 $v_b>\frac{V_{CC}}{2}$)的期间，i_{b1} 为正，V_{be1} 为正，管子 T_2 反偏截止，于是由 V_{CC}、T_1、C_2、R_L 组成的射极跟随器，其输出信号 v_o 开始跟踪输入信号 v_i（即完成了正半周的电流和功率的放大），同时由电源 V_{CC} 给电容器 C_2 充电，补充在负半周放出的能量，维持其$\frac{v_{CC}}{2}$ 电压不变；在v_i 为负半周（即 $v_b<\frac{V_{CC}}{2}$）的期间，i_{b2} 为正，v_{be2} 为正，管子T_1 反偏截止，于是由C_2 的放电电压（$\frac{V_{CC}}{2}$）、T_2、R_L 组成的射极跟随器，其输出信号 v_o 开始跟踪输入信号 v_i（即完成了负半周的电流和功率的放大）。但这一跟踪，只有在 v_b 超过$\frac{V_{CC}}{2}$ 0.4～0.5 V（对于 T_1） 和 v_b 低于 $\frac{V_{CC}}{2}$ 0.1～0.2 V （对于 T_2）之后，才有明显的效果，在这之前，管子的死区电压将使得输出信号 v_o 产生交越失真。如果不计及两管约 0.2 V 的饱和压降，跟踪输出信号 v_o 的幅值 v_{om} 可接近 $\frac{V_{CC}}{2}$，因此，负载电阻 R_L 能得到的最大不失真功率接近 $V_{CC}^2/8R_L$。在这一状态下的效率仍为 78.5%。为改善输出信号 v_o 的交越失真，常采用图d） 所示的甲乙类功率放大器。它由R_W、 R_1、 D_1、 D_2、 R_2和 V_{CC} 构成的偏置电路，给两管提供较小的静态电流 I_B 和 I_C。但静态时仍要求两管射极电位为 $V_{CC}/2$，这是由管子特性的对称性保证的。这一电路的缺点是设置了容量很大的电解电容器 C_2， 使放大器的频率响应变坏。为此，常采用如图 1.1.8-52 所示的所谓 OCL（前者称为 OTL） 电路，即把 T_2 集电极接负电源 V_{CC}，负载 R_L 跨接在两管射极与“地”之间，对“地”输入端不变。如果两管特性对称，静态时

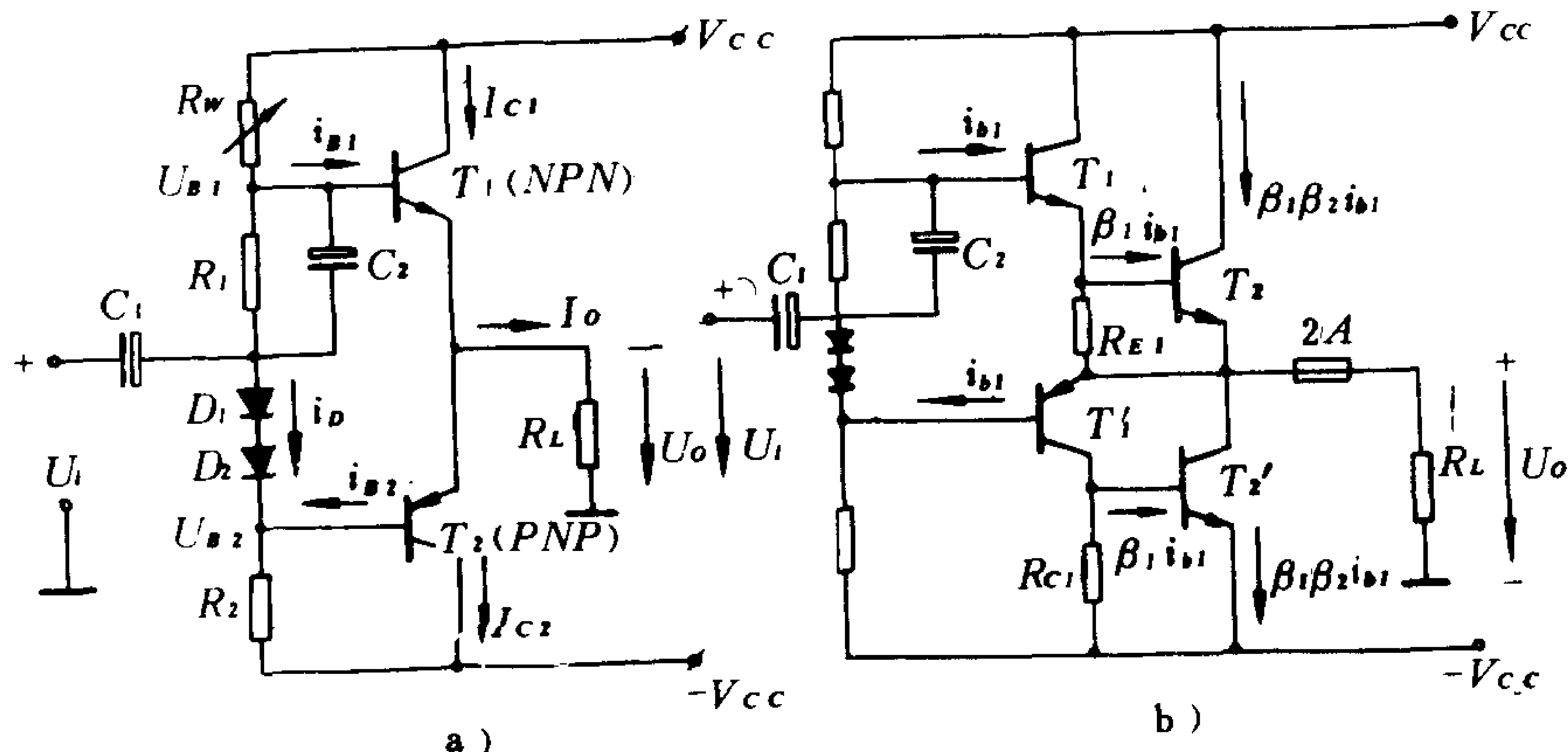


图 1.1.8-52 *OCL* 电路

a)单管 *OCL*；b)复合管 *OCL*

虽有较小的射极电流（甲乙类），但射极电位仍为零，故静态时负载 R_L 中无电流。但如果因两管调整不当，或因元器件损坏，将有较大的静态电流流向 R_L，可能造成管子损坏。为此，常与 R_L 串联熔断器加以保护。这是 *OCL* 电路的缺点。

为了增加输出功率和减轻前置级的负担，*OCL* 电路中的输出管也可以采用如图 1.1.8-52 b) 所示的复合管。一种实用性的 *OTL* 电路如图1.1.8- 53。

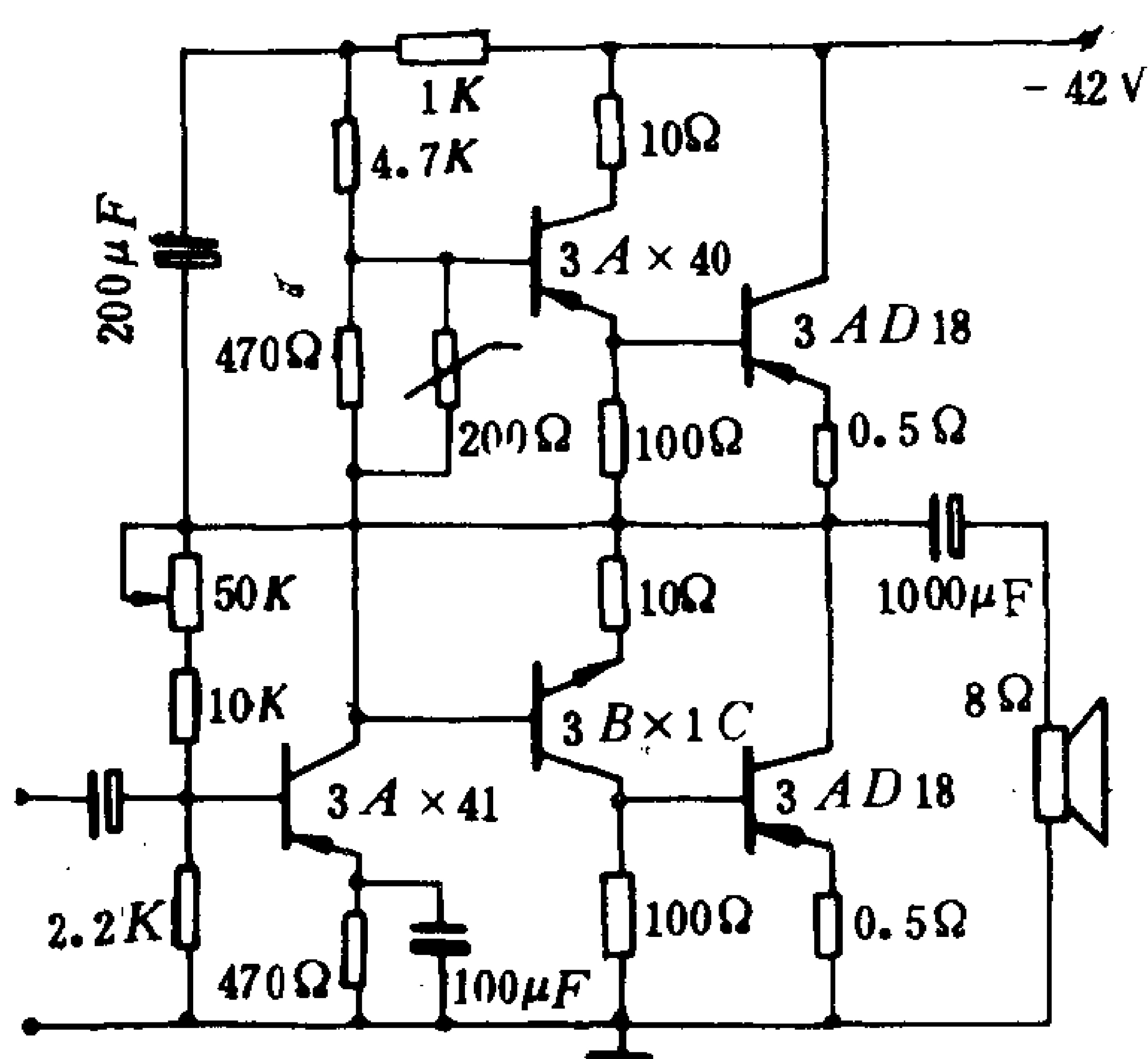


图 1.1.8-53 *OTL* 电路

4 直流放大器

4.1 差动放大器

随时间缓慢变化的信号是无法通过阻容耦合放大器的。而将隔直耦合电容短接，又存在着静态值的相互牵制和工作点的漂移等问题。故直流信号的放大常采用对管差动放大电路。图 1.1.8-54 a) 为具有发射极电阻 R_E 的基本差动放大电路。如果不考虑信号源内阻 R_S，其静态值的计算方法与分压式偏置电路的类似：$V_B=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{cc}\approx V_E=2I_ER_E$，所以 $I_{c1}=I_{c2}\approx I_E\approx\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}\cdot\frac{V_{cc}}{2R_E}$，$V_{CE1}=V_{CE2}=V_{cc}-I_c(R_C+2R_E)$，$I_{B1}=I_{B2}=\frac{I_C}{\beta}$。当在两边输入大小相等，极性（对于直流）或相位（对于交流）相反的信号（称为差模信号）后（图a），如果电路对称，则一管集极电流（位）增加（降低），另一管作等量的相反变化，因而两管射极电流之和、射极电位恒定不变，即射极对于差模信号相当于“地”电位。所以，单边电压增益、输入电阻、输出电阻与射极电阻具有旁路电容的单管放大电路的相同。当在两边输入大小相等，极性或相位相同的信号（称为共模信号）后（图b），在电路参数对称的情况下，两管集极电流（位）发生相同的变化，两集极间的输出（称为双端输出）信号 $\dot{V}_O$ 为零，故双端共模电压增益 A_{C2} 为零。但每管集电极对“地”输出（称为单端输出）信号仍为 $\dot{V}_{C1}$（或 $\dot{V}_{C2}$），由于射极 $2\dot{I}_eR_E$ 强烈电流串联负反馈，单端共模电压增益 $A_{C1}=\frac{\beta R_C}{R_{B2}+r_{be}+(1+\beta)2R_E}\approx\frac{R_C}{2R_E}$（当$R_{B2}$、$r_{be}\ll 2\beta R_E$ 时）。

为了衡量差动放大电路对共模信号（例如温度的变化，电源的波动，元件参数的变化等）的抑制能力，把差模电压增益 A_d 与共模电压增益 A_c 的比值，即 $CMRR=\frac{A_d}{A_c}$ 称为共模抑制比。电路参数愈对称，A_{C2} 愈接近于零，CMRR 也愈大；射极电阻 R_E 愈大，电流负反馈作用愈强，A_{C1} 愈小，CMRR 也愈大，抑制零点漂移的效果就愈好。但 R_E 增加得过大，为维持管子合适的静态值 I_C、V_{CE}，就必须相应地增加电源电压 V_{CC} 和下部偏流电阻 R_{B2}，这又使得差模电压增益 $A_d=\frac{BR_C}{R_{B2}+r_{be}}$ 降低。为此，射极电阻 R_E 常采用接负电源 V_{ee} 的办法，如图 1.1.8-55 a)。这样既能保证管子有合适的静态值，又能降低基极静态电位（减小 R_{B2}，以提高 A_d）；为了进一步提高 CMRR 仅依赖于 R_E 的增加（势必 V_{ee} 也跟着增加）是有限的。如果射极采用恒流源电路，如图 1.1.8-55 b)所示，则因其具有高达数兆欧的动态电阻，电流负反馈作用更

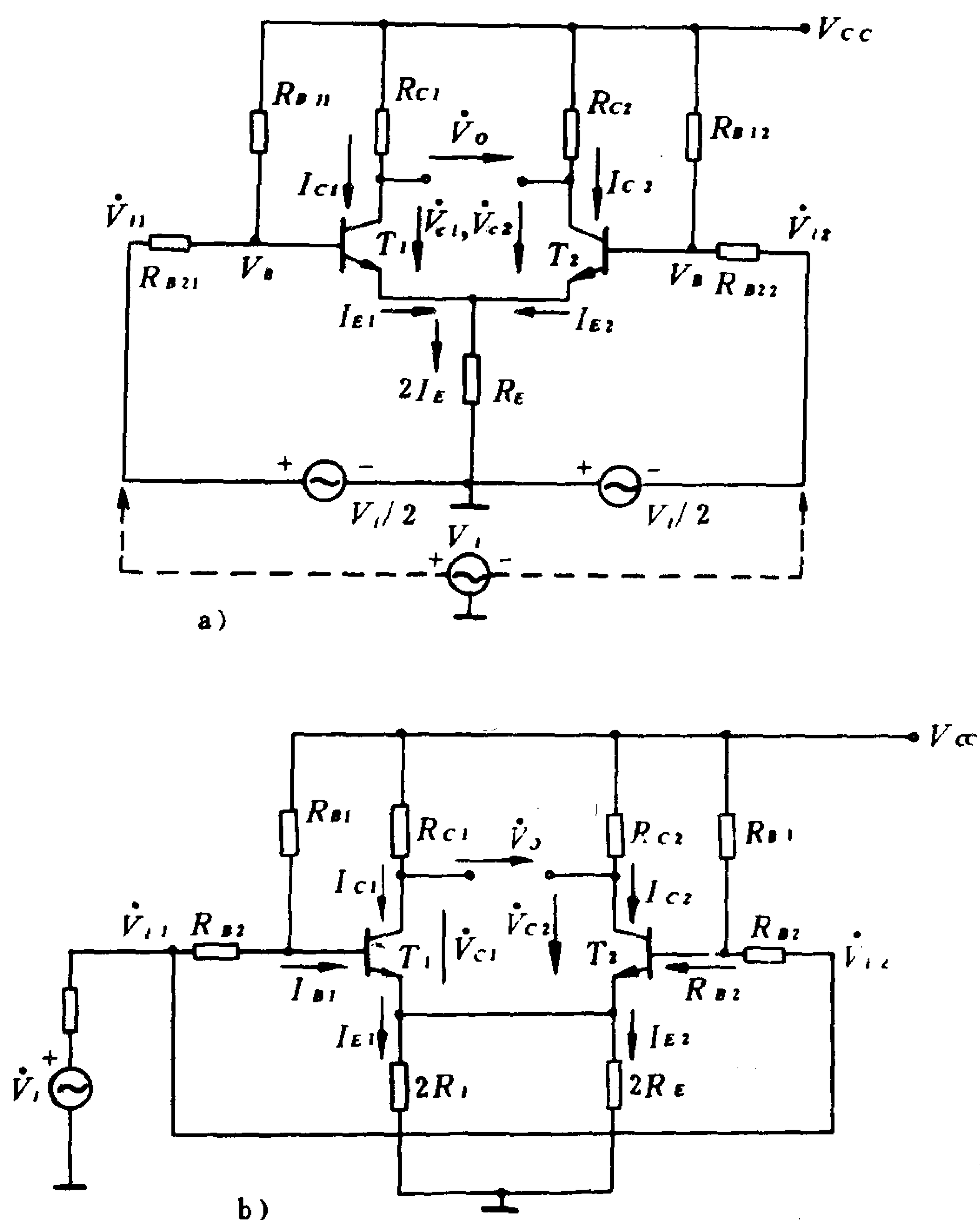


图 1.1.8-54　差动放大电路

a)差模信号输入；b)共模信号输入

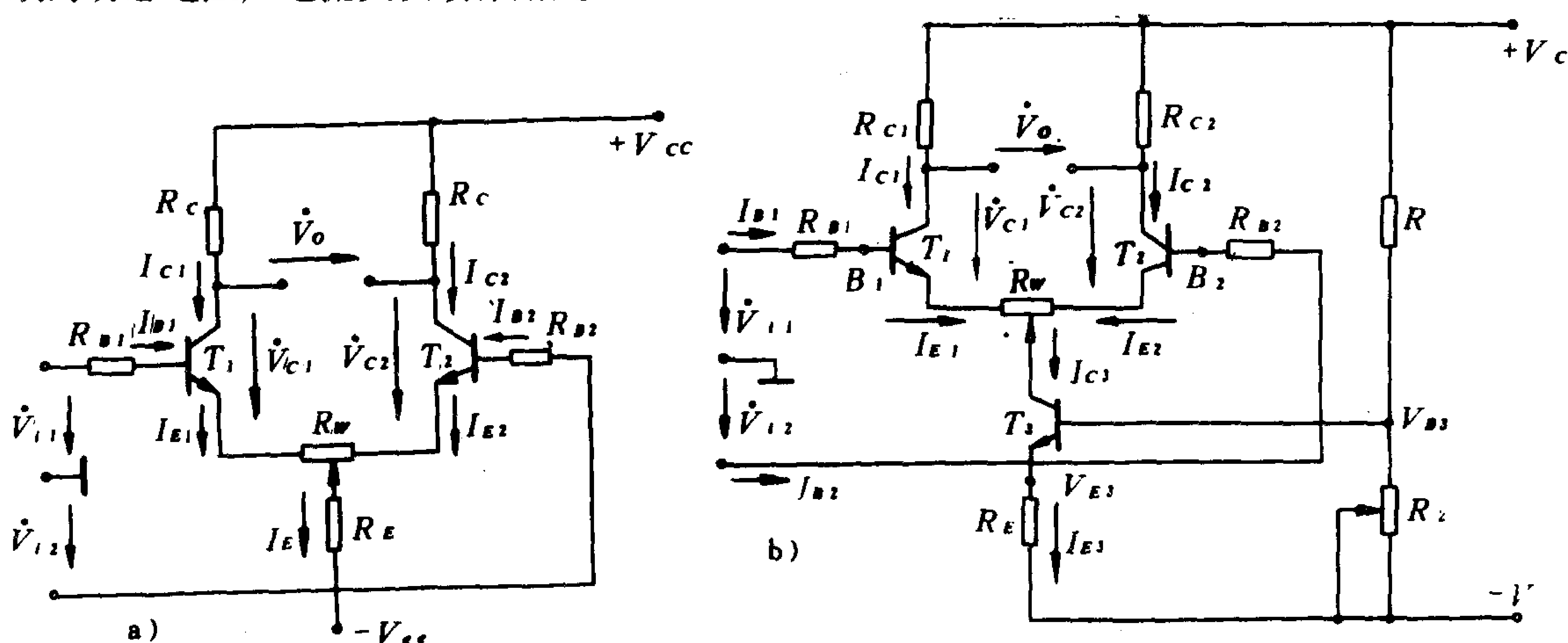


图 1.1.8-55　射极采用负电源的差动放大电路

a)射极串联 R_E；b)射极串联晶体管恒流源

强，使 CMRR 大大提高，且其静态电阻并不大，所需负电源 V_{ee}的电压并不高。由于射极接有负电源 V_{ee}，R_E 上的静态电压降 I_ER_E（或 T_3 的集-射极电压 V_{CE3}）可由 V_{ee} 补偿。因此，偏流电阻 R_B 的阻值可取得很小。在信号源内阻 R_S 不太大的情况下，对于图a)，两管的静态值为：V_B 接近于零，但略低于零，$V_E \approx -0.7V$，$I_{E1}=I_{E2}\approx \frac{1}{2}I_E=\frac{V_{ee}}{2R_E}$，完全由 V_{ee} 和 R_E 决定，$V_{CE1}=V_{CE2}=V_{CC}-I_{E1}R_{C1}$；对于图b)，两管的静态值为：$V_{E3}\approx V_{B3}=\frac{R_2}{R_1+R_2}(V_{CC}+|V_{ee}|)$，$I_{C1}+I_{C2}\approx I_{E1}+I_{E2}=I_{C3}\approx I_{E3}=\frac{V_{E3}}{R_E}\approx\frac{R_2}{R_1+R_2}\cdot\frac{V_{CC}+|V_{ee}|}{R_E}$，完全由 R_1、R_2、V_{CC}、V_{ee} 和 R_E 决定，调整 R_2 或 R_E，即可改变两管的静态值。

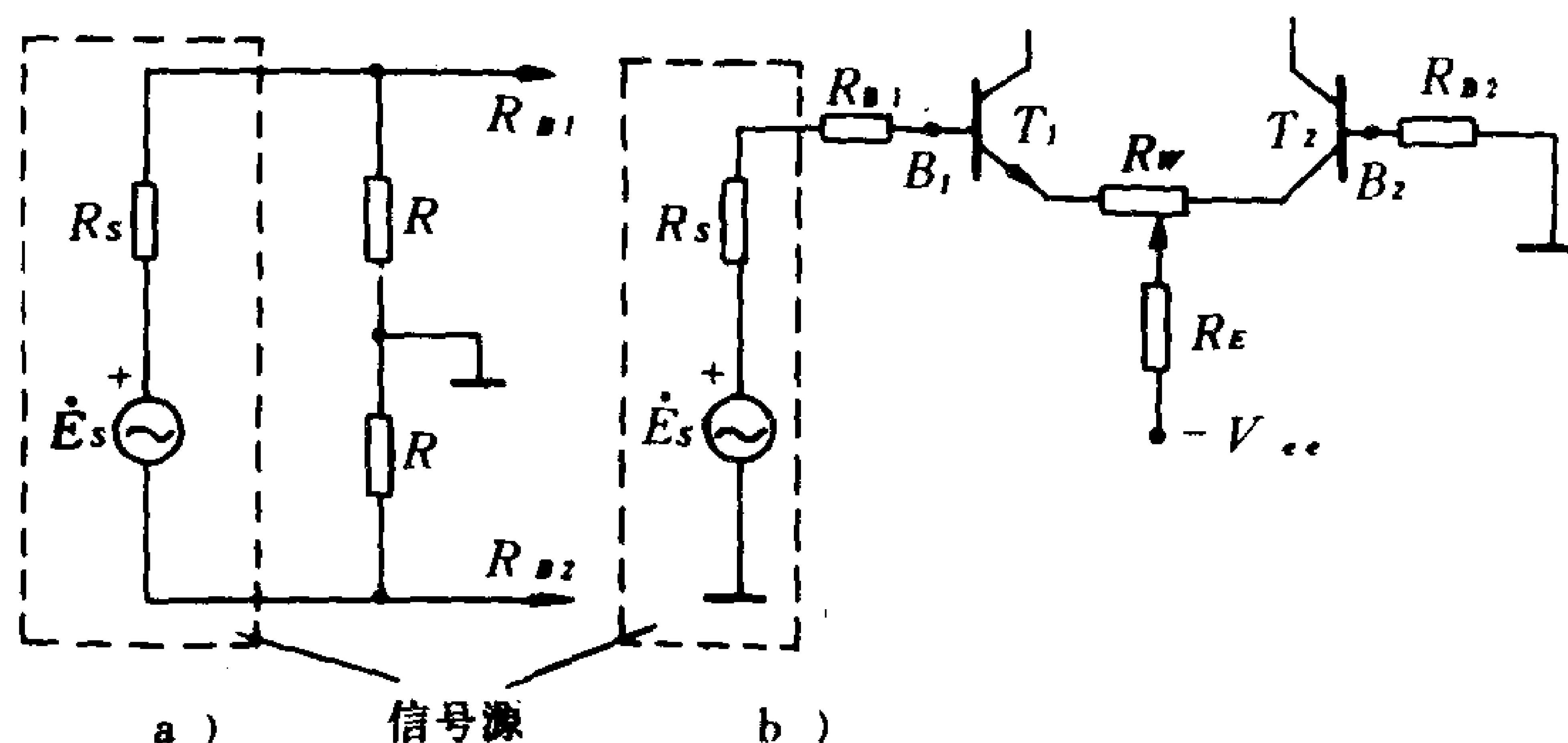


图 1.1.8-56　两种输入方式
a）双端输入；b）单端输入

当前级输出信号有中点接“地”，即能构成差模信号，且信号源内阻很小时，可采用图 1.1.8-55 所示的双端输入方式；如果没有中间接“地”点，两端也都不接“地”，或者虽有中间接“地”点，但信号源内阻甚大，无法提供两管静态I_{B1}，I_{B2}，可采用如图1.1.8-56 a）所示带均压电阻 $2\times R$ 的双端输入方式，如果前级输出信号有一端接“地”，且其内阻很小，就要采用如图 1.1.8-56 b）所示单端输入方式。单端输入方式中，一管基极电阻（如 T_2 的 R_{B2}）接“地”。如此说来，差动放大电路共有四种工作方式：双端输入-双端输出（输出信号取自两管集电极）；单端（例如 B_1 端对“地”）输入-单端输出（输出信号取自 T_1 集极到“地”，为反相信号，取自 T_2 集极到“地”，为同相信号）；双端输入-单端输出；单端输入-双端输出。它们的增益、输入、输出电阻的比较，如表 1.1.8-2 所示。

4.2　运算放大器

4.2.1　运算放大器的组成和传输特性

运算放大器是一个具有极高（达 10^9）电压增益的多级直流放大器。它可以由分立元件组成，也可以用集成化工艺制成集成芯片。运算放大器一般由差动放大电路的输入级、中间放大级和 OCL 推挽电路的输出级组成。输入级采用双端输入-双端输出差动电路，中间级采用双端输入-单端输出差动电路，其结构方框图如图 1.1.8-57 a)、b）所示，是它的电路符号，⊕、⊖、O 分别表示同相、反相输入端和输出端，$+V_{CC}$，$-V_{ee}$ 为大小相等的正负电源端，A_{vo} 为运算放大器的开环电压增益。由于运算放大器的开环电压增益极高，只要在输入端加极微小的信号 V_i（毫伏数量级以内），就会使输出电压 V_0 趋近于正（或负）电源电压的饱和值，其传输特性，如图 1.1.8-58 所示。图中实、虚线分别表示正、反相传输特性。

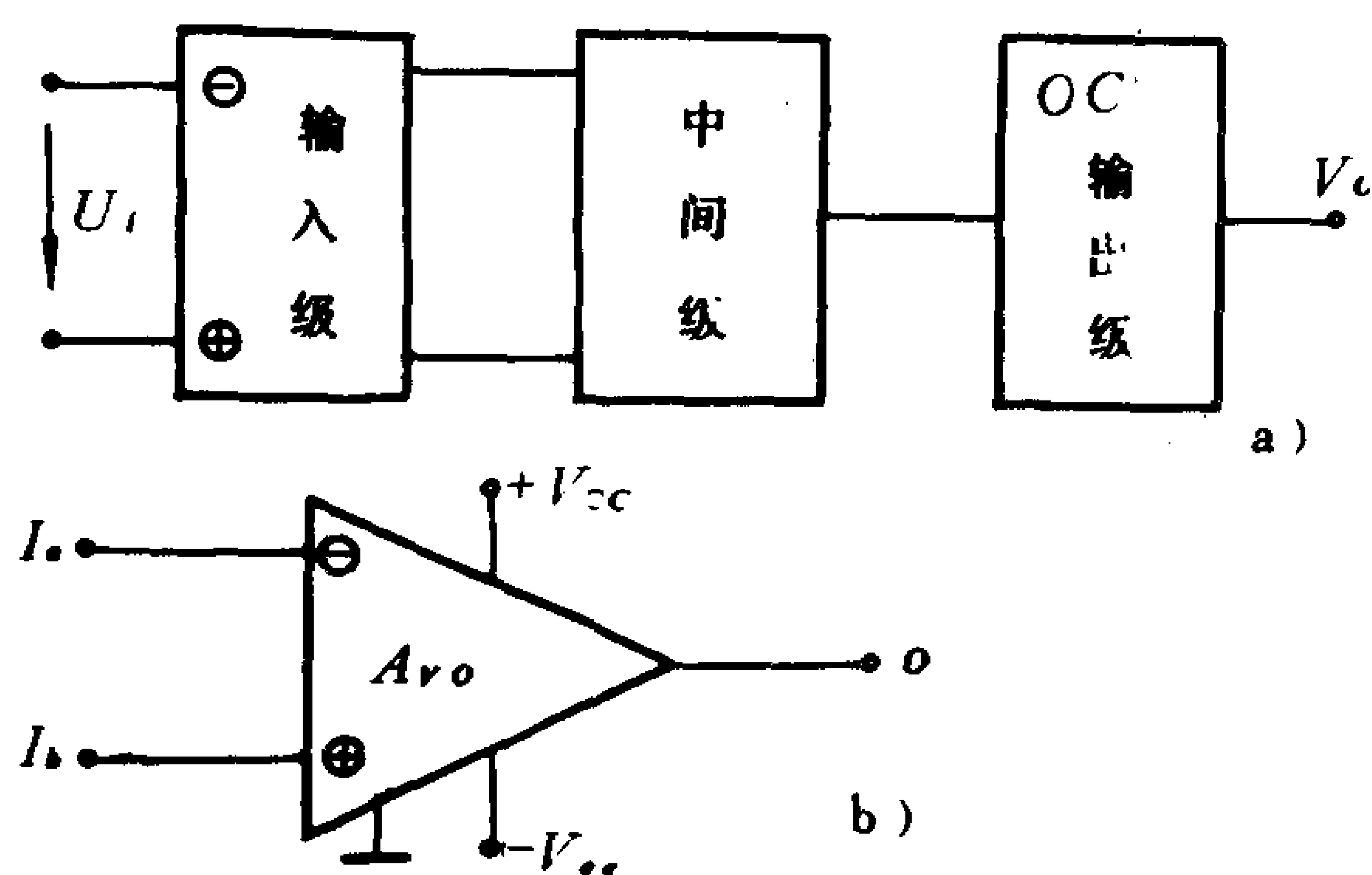


图 1.1.8-57　运算放大器的组成和电路符号

a)组成框图；b)电路符号

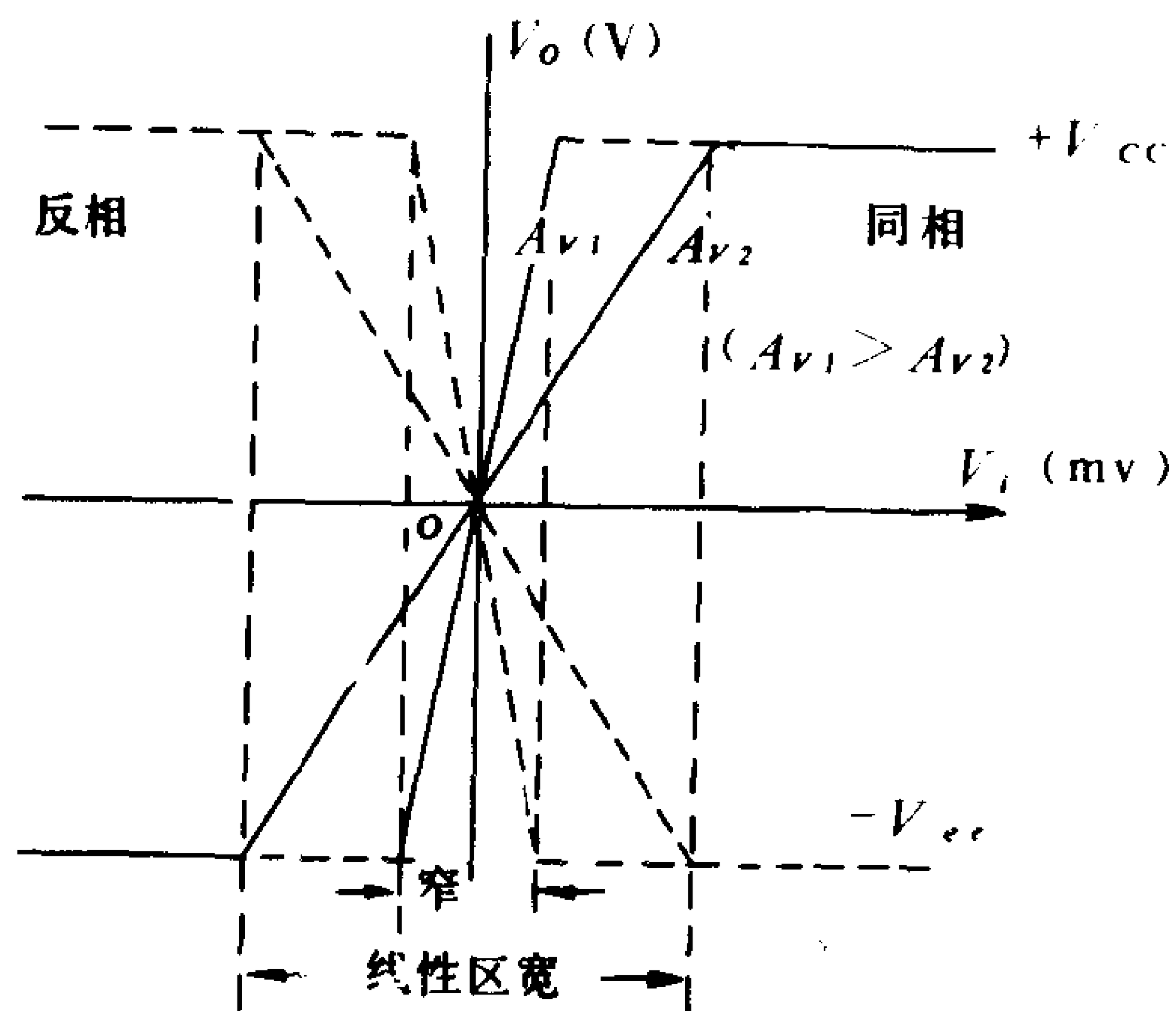


图 1.1.8-58　运算放大器的正反相传输特性

表 1.1.8-2　**几种差动放大电路的比较**

工作方式	电路图	差模电压增益 A_d 共模电压增益 A_c	输入电阻 r_i 输出电阻 r_o	CMRR	特点和使用场所
①双端输入出	①	$A_d=-\frac{\beta R_L'}{R_B+r_{be}}$ $(R_L'=R_C /\!/ 0.5R_L)$ $A_c=0$(参数对称)	$r_{id}=2(R_B+r_{be})$ $r_{ic}=\frac{1}{2}(R_B+r_{be})+(1+\beta)R_E \approx \beta R_E$ $r_o=2R_C$	∞ 参数(一)对称	常用于运算放大器的输入级
②单端输入出	②	$A_d=\pm\frac{\beta R_L'}{2(R_B+r_{be})}$ $(R_L'=R_C /\!/ R_L)$ $A_c=\pm\frac{\beta R_L'}{R_B+r_{be}+2(1+\beta)R_E}$	r_{id}, r_{ic} 同上 $r_o=R_C$	$\frac{\beta R_E}{R_B+r_{be}}$	用于输入、输出均需一端接地的场所。增益的正号表示同相，负号表示反相
③双单端输入出	③	同上	同上	同上	将双端输入转换为单端输出，常用于多级放大器的输入级和中间级

工作方式	电路图	差模电压增益 A_d 共模电压增益 A_c	输入电阻 r_i 输出电阻 r_o	CMRR	特点和使用场所
④ 单端输入双端输出	④	同①	r_{id}, r_{ic} 同上 $r_o=2R_C$	同①	将单端输入转换为双端输出，常用于多级放大器的输入级

4.2.2 运算放大器的基本数学运算关系

它的最基本数学运算有比例运算，加减法运算，积分、微分运算，对数运算和反对数运算等。图 1.1.8-59 为反相输入比例器。在导出它的输入输出关系时，可直接把运算放大器视为理想元件，即开环电压增益极高，极微小的 V_{ab} 即可使输出 V_o 达到饱和，所以当输入电流 i_a 极小（r_{io} 极大）时，反相输入端电位 V_a 与同相输入端电位 V_b 很接近，即 $V_a \approx V_b$，或 $V_{ab}\approx 0$，把这一概念称为"虚短接"。如果如图所示，同相输入端 b 通过电阻 $R_2=R_1 /\!/ R_f$ 接"地"，则因 i_a 极小（称为虚断路），$U_b\approx 0$，因而 $V_a\approx 0$，称 a 点为"虚地"。由此基本概念，可直接导出运算放大器的输入输出关系。

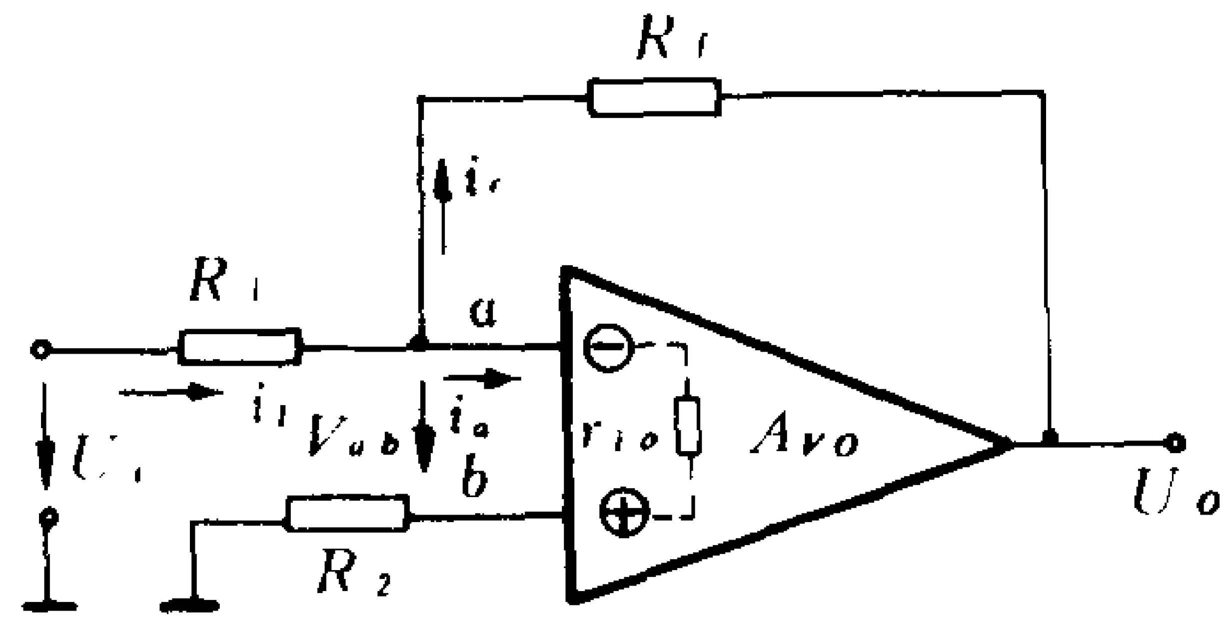


图 1.1.8-59 反相输入比例器

在图 1.1.8-59 中，$i_1\approx\dfrac{V_i}{R_1}$，$i_f\approx-\dfrac{V_O}{R_f}$，$i_a\approx 0$，$i_1\approx i_f$，所以$A_{vf}\approx\dfrac{V_O}{V_i}=-\dfrac{R_f}{R_1}$。如果$R_f=R_1$，则$A_{vf}=-1$，此运算放大器即构成反相器。根据这一概念导出的各种运算关系见表 1.1.8-3。

4.2.3 运算放大器的应用

运算放大器属于一种通用型电子器件。它的应用具有很大的灵活性和多样性，应用范围也极为广泛。根据其传输特性来分，运算放大器有线性运用和非线性运用两大类。上述基本运算关系都属于线性运用的一部分。此外，象电流电压转换电路，有源滤波器，正弦波信号发生器等也属于线性运用范畴。非线性运用方面有非正弦（矩形波、三角波、锯齿波等）信号发生器以及精密交直流变换器等。

1）电流-电压变换器 如图 1.1.8-60 所示的变换器，可以把极微小的光照电流（通常在纳安数量级以下），变换为伏特级的电压。根据 a 点为"虚接地"概念和电路基本定律，可得

$$V_o=-i\left[R_f\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)+R_1\right]$$

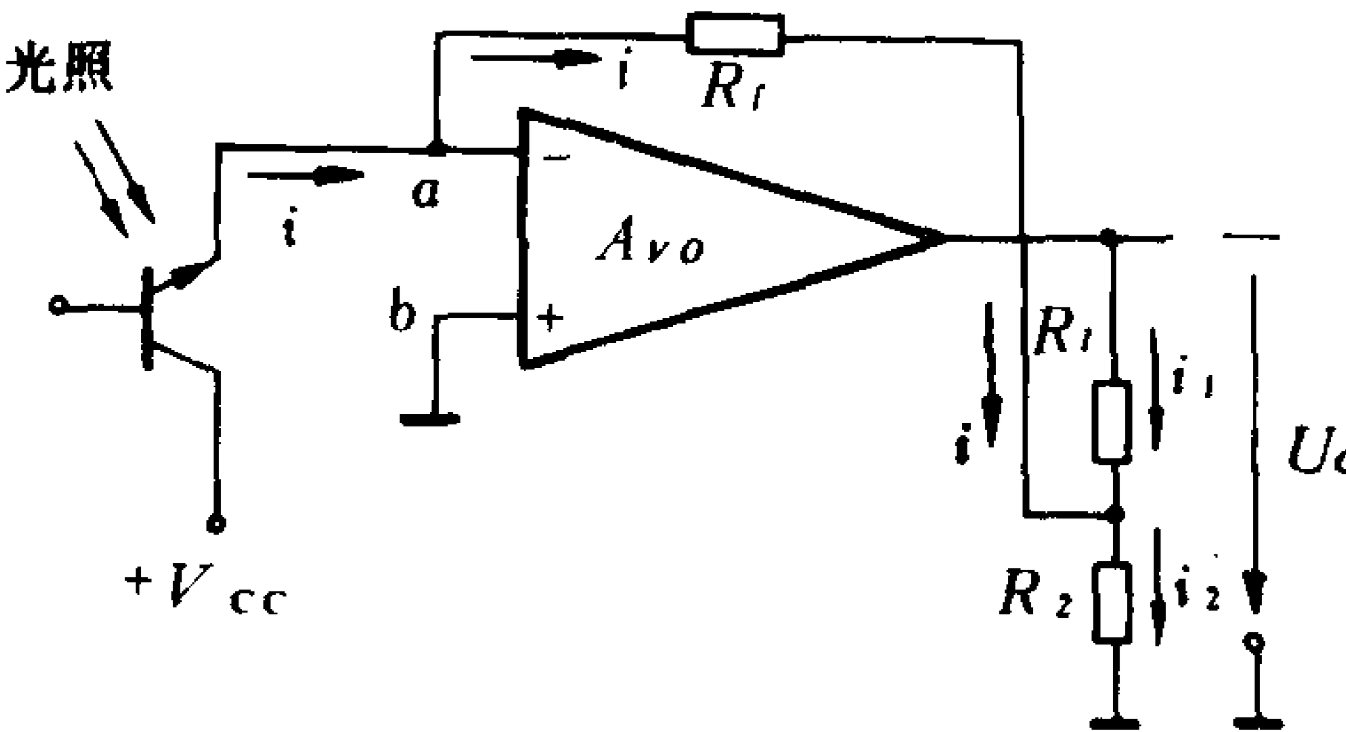


图 1.1.8-60 电流-电压变换器

表 1.1.8-3 运算放大器的基本运算电路

名称	电路图	输入输出基本关系	特殊形式或说明
反相输入比例放大	①	$V_o=A_{vf}V_i=-\frac{R_f}{R_1}V_i$ $(R_2=R_1/\!/R_f)$	$R_f>R_1$,反相放大器 $R_f<R_1$,反相衰减器 $R_f=R_1$,反相器($V_o=-V_i$)
同相输入比例放大	②	$V_o=A_{vf}V_i=(1+\frac{R_f}{R_1})V_i$ $(R_2=R_1/\!/R_f)$	$R_f=0$,或 $R_1=\infty$, $V_o=V_i$ 跟随器
反相输入加法运算	③	$V_o=-(\frac{R_f}{R_{11}}V_{i1}+\frac{R_f}{R_{12}}V_{i2})$ $(R_2=R_{11}/\!/R_{12}/\!/R_f)$	$R_{11}=R_{12}=R_f$ $V_o=-(V_{i1}+V_{i2})$ 反相加法器
双端输入减法运算	④	$V_o=\frac{R_3(R_1+R_2)}{R_1(R_2+R_3)}V_{i2}-\frac{R_f}{R_1}V_{i1}$ $(R_3/\!/R_2=R_1/\!/R_f)$	$R_1=R_2=R_3=R_f$ $V_o=V_{i2}-V_{i1}$ 减法器
反相输入积分运算	⑤	$V_o=-\frac{1}{R_1C_f}\int_0 V_i dt$ $(R_2=R_1)$	V_i 为矩形脉冲时，V_o 为锯齿波 V_i 为直流时，$V_o=-\frac{Et}{R_1C_f}$
反相输入微分运算	⑥	$V_o=-R_fC\frac{dv_i}{dt}$ $(R_2=R_f)$	V_i 为矩形脉冲时，V_o 为正负尖峰脉冲
反相输入对数运算	⑦	$V_o=-V_D=-V_T(\ln\frac{V_i}{R_1}-\ln I_s)$ （V_o、V_i 以伏为单位，R_1 以千欧为单位）	V_T——温度电压当量，300°k约 26 mV I_s——二级管反向饱和电流（单位 mA）
反对数或指数运算	⑧	$V_o=-R_fI=-R_fI_s\ln^{-1}(\frac{V_i}{V_T})$ $=-R_fI_se^{V_i/V_T}$ （单位同上）	V_T、I_s 同上

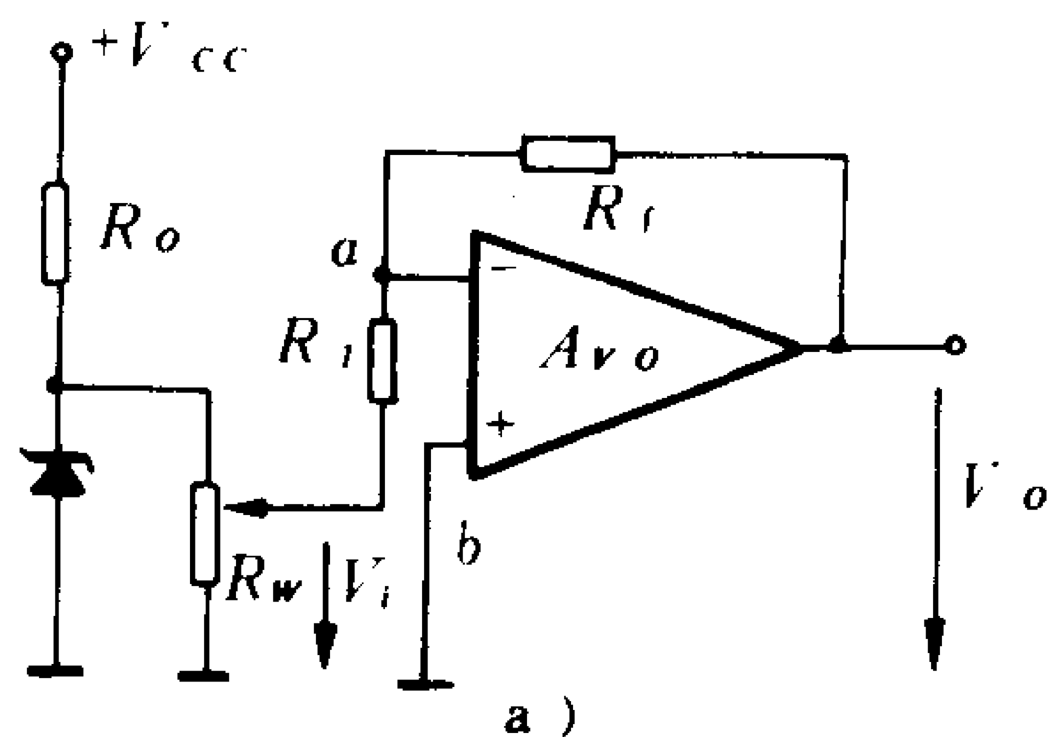
2）恒压电源和恒流电源　图 1.1.8-61 a）为可调恒压源原理性电路，根据反相比例运算关系，可直接写出输出与输入的关系为

$$V_o=-\frac{R_f}{R_1}V_i \tag{1.1.8-55}$$

对于图b)，应用电路的基本定律，可写出 a、b两点的电位表示式为：$V_a=V_o$，$V_b=I_LR_L+E$，由于 A_{vo} 足够大，$V_b\approx V_a$，所以，$I_L=\frac{E}{R}$，与负载电阻 R_L 无关。改变 R 或 E 的大小，即可调节恒流源输出电流的大小。

3）有源滤波器　图 1.1.8-62 a）为有源低通滤波器电路，由于 a 点为“虚地”，a、

b 间又为"虚断路"，所以 $\dot{V}_a \approx 0$，$\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$，而 $\dot{V}_i = \dot{I}_i R_1$，$\dot{V}_o \approx -\dot{I}_f Z_f = -\dot{I}_f \frac{R}{1+j\omega CR}$，$\dot{A}_f(\omega) = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{R}{R_1} \cdot \frac{1}{1+j\omega cR} = -\frac{R}{R_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(\omega cR)^2}} e^{-j\tan^{-1}\omega cR} = -A_f(\omega) \angle \varphi(\omega)$，$A_{f(\omega)} = \frac{R}{R_1\sqrt{1+(\omega CR)^2}}$ 为幅频特性，如图b)所示。$A_{f(0)} = \frac{R}{R_1}$ 为 $\omega = 0$ 时的闭环电压增益。



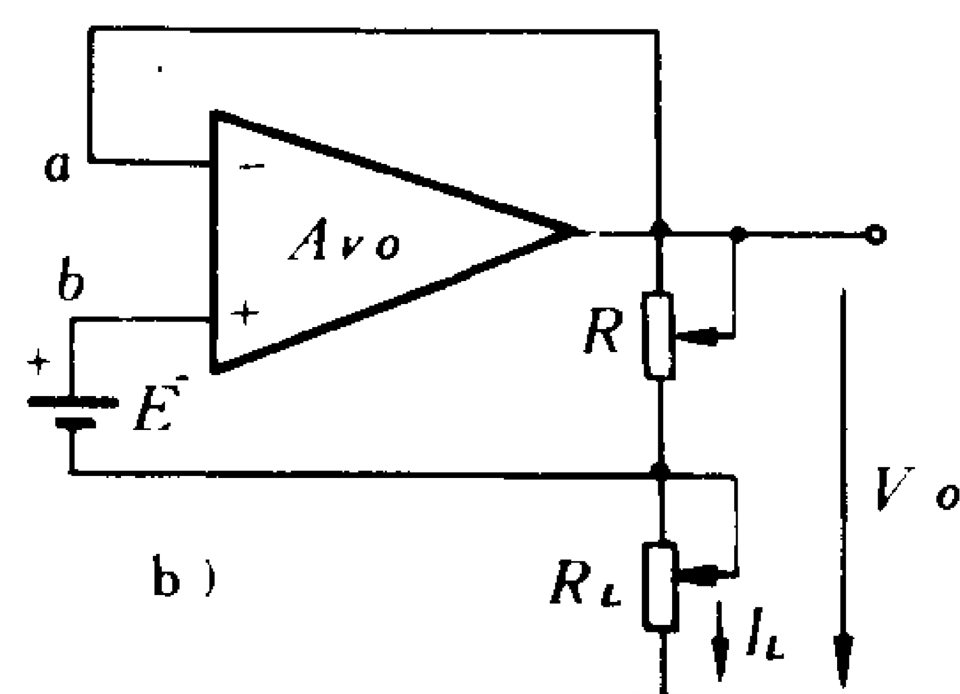


图 1.1.8-61 稳定电源

a）可调恒压源；b）可调恒流源

如果把图a）中的 C 换为 L 即可构成高通滤波器，其低端截止频率为 $\omega_L = \frac{R}{L}$，而对于图b）所示低通滤波器的高端截止频率为 $\omega_c = \frac{1}{RC}$。

4）电压比较器 比较器是用来比较输入信号和参考信号的一种运算电路，如图 1.1.8-63 所示。同相输入端 b 加参考电压 V_R，反相输入端 a 加输入信号 V_i。如果 $V_i < V_R$，即 $V_{ba} > 0$，运算放大器输出为正，且等于稳压管的稳定电压 V_z，即输出 $V_o = V_z$ 为高电位；如果 $V_i > V_R$，$V_{ab} > 0$，放大器输出为负，稳压管正向导通，输出 $V_o = -V_D$（约 0.7 V）为低电位。

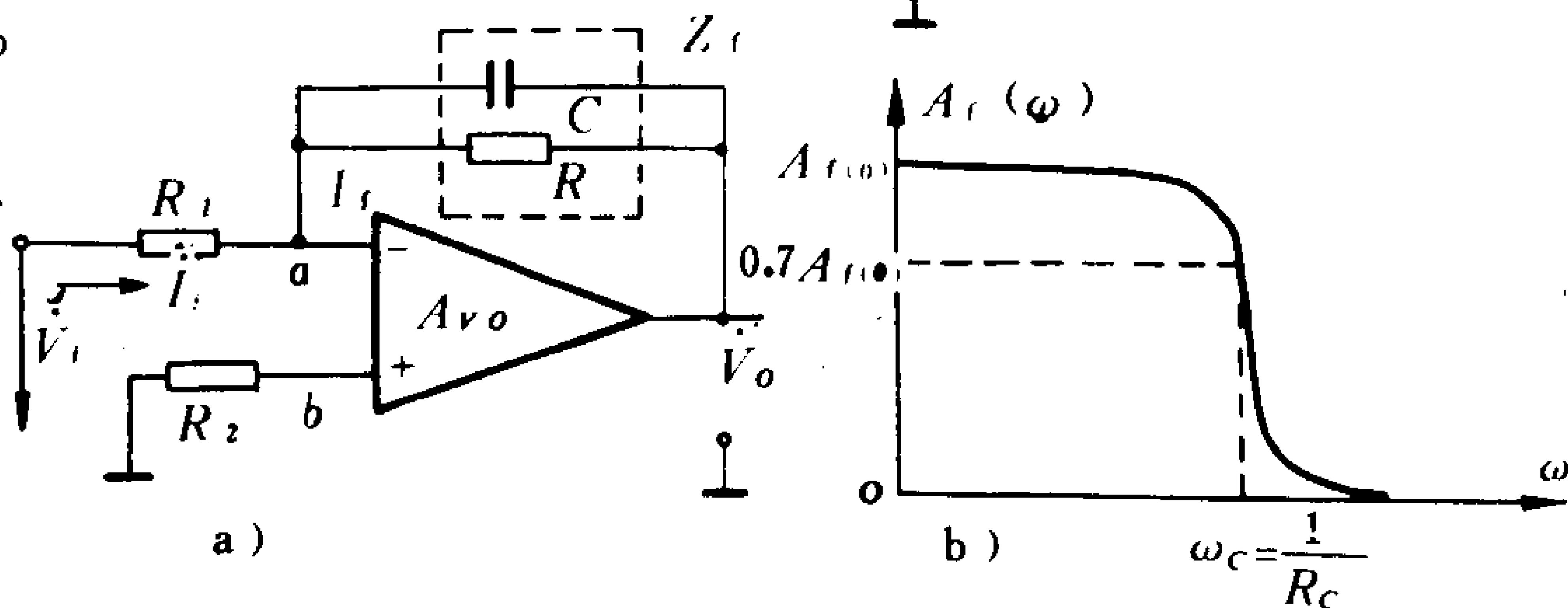


图 1.1.8-62 有源低通滤波器

a）基本电路；b）幅频特性

5 正弦波振荡器

5.1 产生正弦波振荡的条件

正弦波振荡器在测量、自动控制、通信和遥测等许多技术领域中有着广泛的应用。

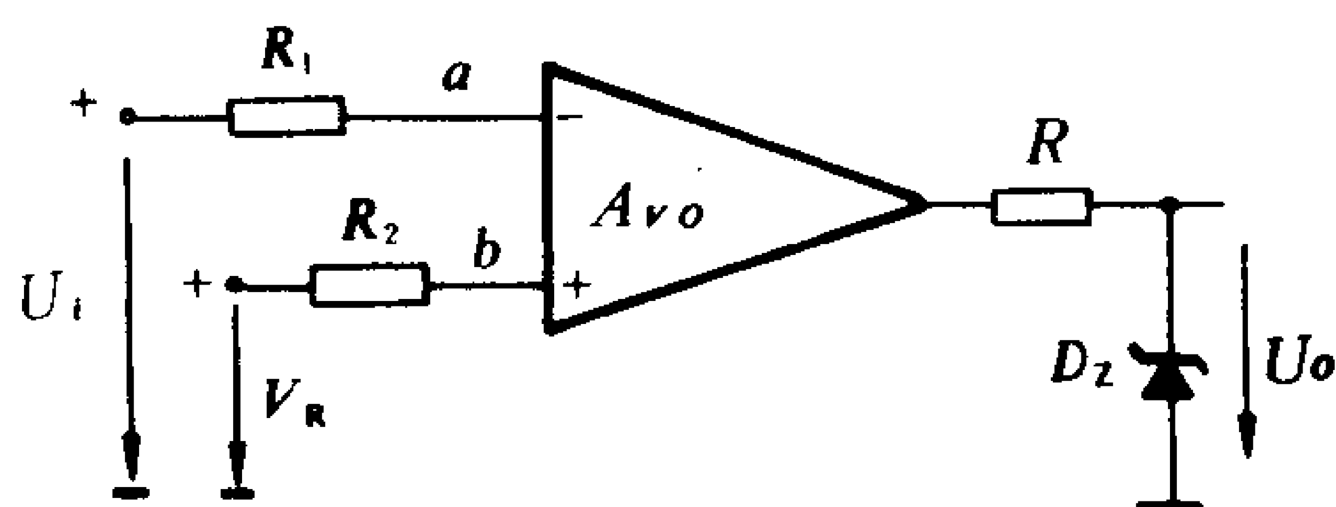


图 1.1.8-63 电压比较器

在放大器中，常常引入负反馈以改善放大器的性能。但如果参数取得不当，使正确的负反馈产生了 180°附加相位移，放大器便产生自激振荡，而原来的负反馈也就变为正反馈。所以，正反馈是自激振荡器产生振荡的必要条件，而足够大的反馈量是它的充分条件。在图 1.1.8-64 中，如果将开关 K 先接在 1 端，将信号 $v_i = V_{im}\sin\omega t$ 接在放大器输入端，经放大电路和反馈网络后，2 端得到一个同频率的反馈电压 $v_f = V_{fm}\sin(\omega t + \varphi)$。如果 $v_f = V_i$，则当 K 掷向 2 端时，放大电路的输出 v_o 将

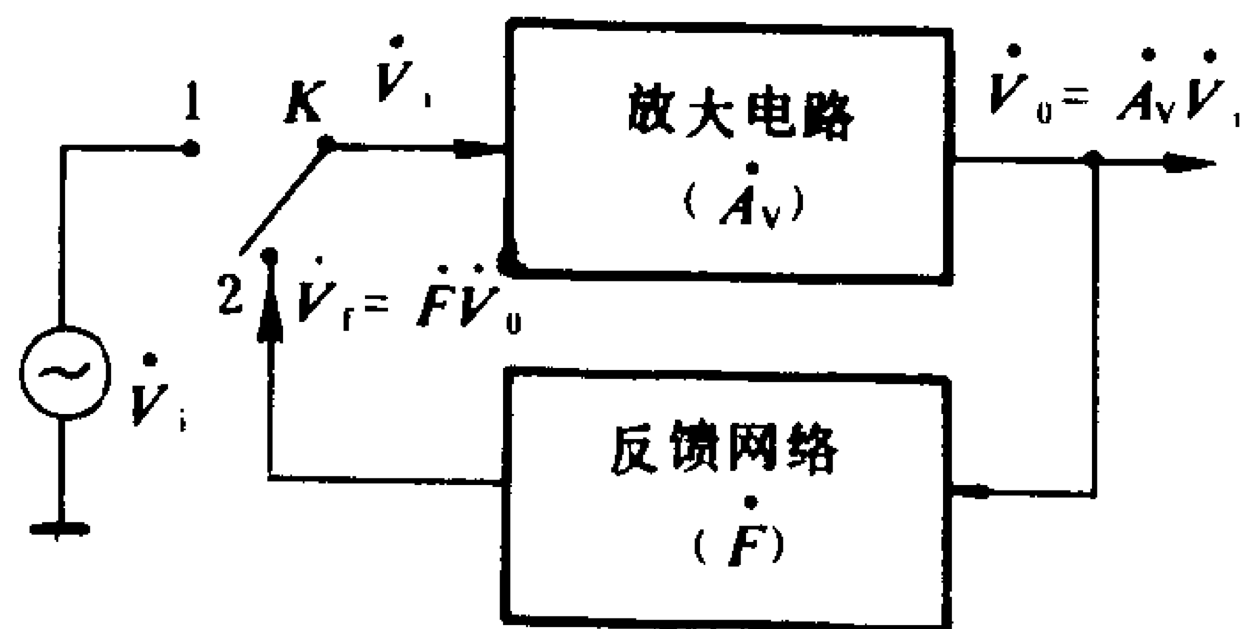


图 1.1.8-64 反馈放大器自激的条件

维持不变，即放大电路自行产生了角频率为 ω 的正弦波振荡。因此，自激振荡的条件是：$v_f=v_i$，即 $V_{fm}\sin(\omega t+\varphi)=V_{im}\sin\omega t$，或 $\dot{V}_i=\dot{V}_f$，即 $\dot{V}_f=\dot{F}\dot{V}_o=\dot{F}\dot{A}_v\dot{V}_i$，故 $\dot{F}\dot{A}_v=1$。由此得到振荡电路能够产生自激振荡的两个基本条件：

（1）幅度平衡条件：反馈信号的振幅应等于输入信号的振幅，即 $V_f=V_i$，或$FA_v=1$；

（2）相位平衡条件：反馈信号必须与输入信号同相位，它们之间的相位差应为 $\varphi=\pm2n\pi(n=0,1,2,3\cdots\cdots)$ 或者 $arc\ \dot{F}\dot{A}_v=\varphi_F+\varphi_A=\pm2n\pi$。

$FA_v=1$ 是指振荡电路已经进入稳幅振荡后的关系。但振荡电路要能自行起振，还必须满足 $FA_{vo}>1$ 的幅度条件。在振幅增长的过程中，由于放大电路非线性的限制，FA_v 便自动从开始的 $FA_{vo}>1$ 逐渐下降到 1，使振荡电路逐渐进入到等幅振荡的稳定状态。

5.2 振荡的建立过程和振幅的稳定

图 1.1.8-65 所示的振幅特性（即放大电路的 $V_o=f_1(\dot{V}_i)$ 特性）和反馈特性（即反馈网络的 $V_f=f_2(V_o)$ 特性）可说明振荡建立的过程。由于放大电路中含有非线性元件，所以振幅特性仅在幅度较小的部分为直线；而反馈网络通常是由线性元件组成的，所以反馈特性是直线，此直线斜率的倒数即为反馈网络的反馈系数 F，而振幅特性曲线上任一点的斜率即为放大电路的动态电压增益 A_v。起振开始的原点，A_{vo} 最大，随着振幅的增长，A_v 逐渐下降，这是因为放大元件进入了非线性工作区域，使管子的 β 和A_v 降低的缘故。振荡电路刚接通电源时，电路中便出现一个电冲击，它包含着很宽范围的各种频率的谐波电压，通过放大和选频，就能将与振荡频率相同的极微小的正弦波电压 V_{i1} 经反馈网络反馈到输入端，而离开振荡频率的一切谐波信号都被选频网络的滤波作用所滤掉。尽管初次的电冲击所激起的输入信号 V_{i1} 的幅度甚小，但经过如图 1.1.8-65 所示的从 1 点开始，直到 A 点这样不断地通过放大→反馈→再放大→再反馈，输出电压的幅度也就不断地增大，一直到达反馈特性与振幅特性曲线的交点 A，振幅才得以稳定。显然，改变反馈系数 F（即改变反馈特性的斜率），振荡幅度也将改变。但是如果将 F 过分地减小，如图中的直线②与振幅特性 ⓐ 相切，或者把放大电路的电压增益 A_v 取得太小，如图中的曲线 ⓑ 与反馈特性①相切而没有交点，振荡器都将无法产生自激振荡。这就是自激过程中为什么要求 $FA_{vo}>1$ 的原因。稳定幅度于 A点 后，FA_v 便自动等于 1。

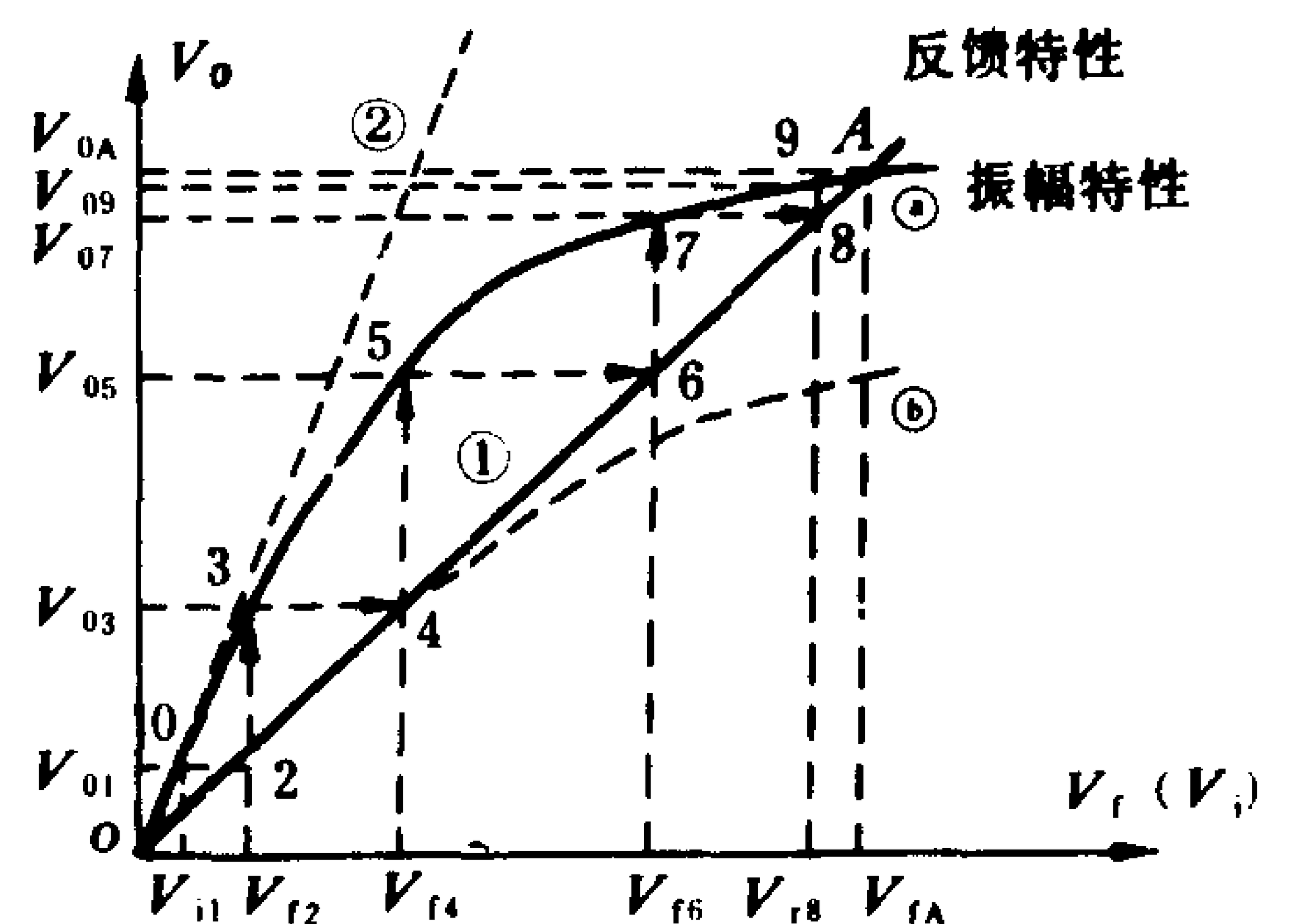


图 1.1.8-65 振荡的建立和振幅的稳定

正弦振荡器都包括放大电路（A_v）、正反馈网络（F）和选频网络三部分。根据选频网络的不同，振荡器可分为 LC 振荡器和 RC 振荡器。

5.3 LC 振荡器

图 1.1.8-66 是 LC 振荡器的基本电路。它由放大电路、LC 选频网络和反馈网络三部分组成。由图中 N_1、N_2 两副线圈的极性安排可判断，此电路属于正反馈，只要反馈线圈 N_2 的反馈电压 V_f 大于放大器的输入电压 V_i，振荡器便能自激起振。输出线圈 N_3 接负载 R_L，N_2 的负载是共射极放大器的输入电阻 $r_i=R_{B1}/\!/R_{B2}/\!/r_{be}$，将 R_L、r_i 都折算到变压器原边 N_1 后，设原边等效串联损耗为 R'，原边等效电感量为 L'（也要考虑副边电感量的折算值），

则 L'、C 并联振荡回路的并联谐振角频率在不计及等效串联损耗 R' 时为 $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L'C}}$。在这一频率下，并联谐振回路相当于 $Z_0 = \frac{L'}{CR'}$ 的纯电阻，且具有最大值，因而放大电路具有最大的电压增益。只有角频率为 ω_0 的信号得到最有效的放大，上、下偏离 ω_0 的一切谐波成分都被 LC 选频网络所滤掉，而且回路的品质因数 $Q=\sqrt{\frac{L'}{CR'^2}}$ 愈高，选频放大和抑制边频的作用愈强，输出 V_0 就愈接近单频率的正弦波。这就是选频网络在获得正弦波振荡方面的重要作用。利用晶体管和放大器的微变等效电路，可导出自激振荡的起振条件为 $\beta > \frac{r_{be}R'C}{M}$，$M$ 是线圈 N_1 与 N_2 之间的互感系数。在反馈极性正确的前提下，改变 N_1/N_2，即改变 M，总可以使之起振。

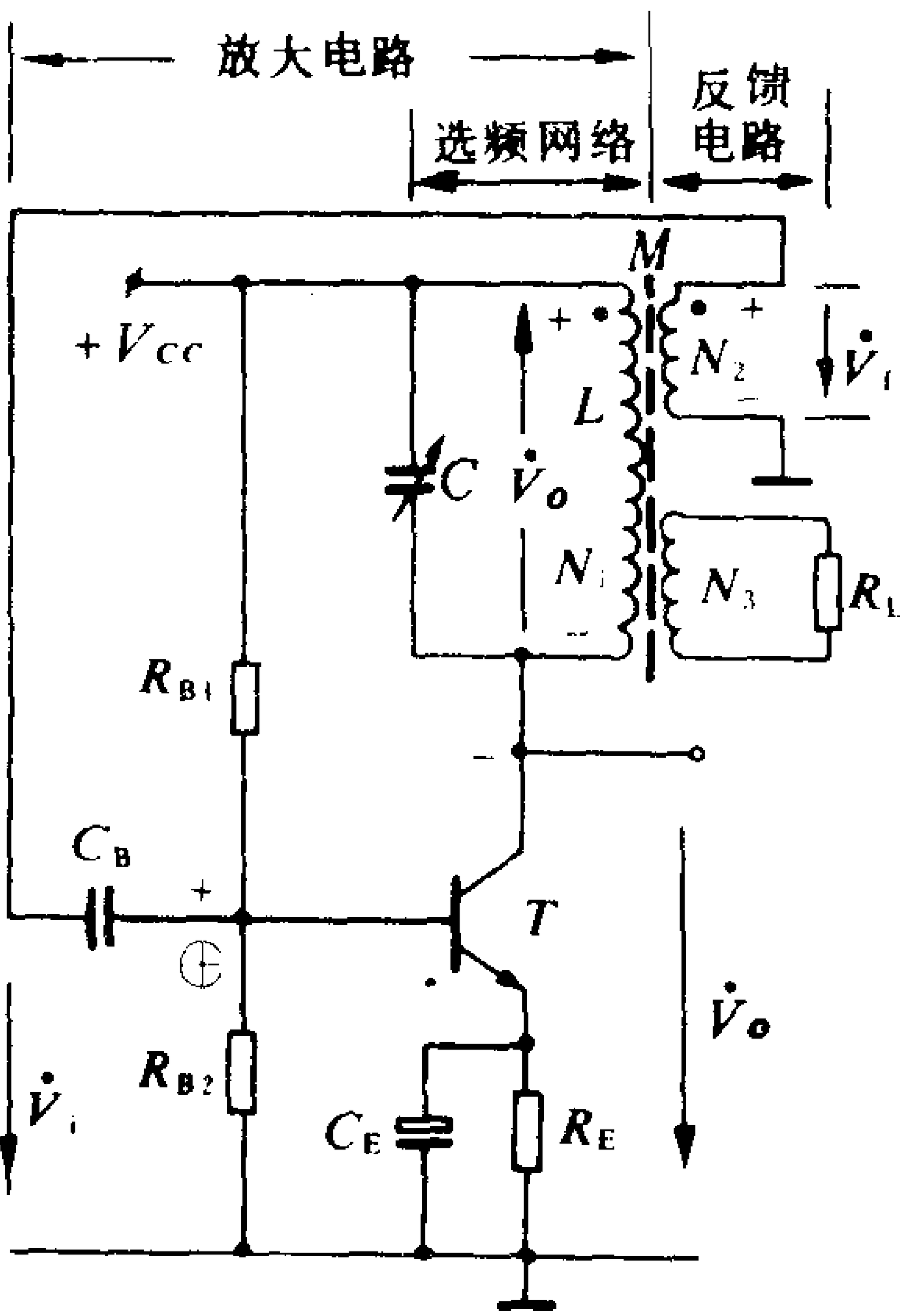


图 1.1.8-66 LC 振荡器一例

LC振荡器的形式很多，表 1.1.8-4 给出了它们的振荡频率、起振条件和频率调节方法等。

5.4 RC 振荡器

表 1.1.8-4 **各种振荡电路**

	电路形式	振荡频率	起振条件	振荡波形	频率稳定度	频率范围
变压器耦合振荡电路	① ②	$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{CL'}-(\frac{R'}{L'})^2} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ L'、R' 为折算到 LC 并联回路中的等效串联电感和电阻的总值	$\beta > \frac{CR'r_{be}}{M}$，$R'$与左相同 M 原边与反馈线圈间的互感 r_{be} 晶体管输入电阻，β 晶体管电流放大系数	一般	可达10^{-4}	几千赫至几十兆赫 频率可调范围宽
电感三点式振荡电路	③	$\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2+2M)C}}$ (近似)	$\beta > \frac{L_1+M}{L_2+M}\cdot\frac{r_{be}}{R'}$ R'为折算到三极管 c、e 间(即 L_1 两端)的等效并联总损耗电阻 β、r_{be}、M同上	高次谐波分量大，波形差	同上	同上

	电路形式	振荡频率	起振条件	振荡波形	频率稳定度	频率范围
电容三点	④	$\frac{1}{2\pi\sqrt{L(\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}+C)}}$ (近似)	$\beta>\frac{C_2}{C_1}\cdot\frac{r_{be}}{R'}$ R' 为折算到三极管 c、e 间(即 C_1 两端)的等效并联总损耗电阻 β、r_{be} 同上	高次谐波分量小，波形好	可达 $10^{-4}\sim10^{-5}$	几兆赫到100兆赫以上，频率可调范围窄
式振荡电路	⑤	$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (近似) C_1、$C_2\gg C$	同上	同上	可达 10^{-5}	同上

5.4.1 RC 串并联网络振荡器

图 1.1.8-67 是 RC 串并联网络振荡器。它由 RC 串并联网络（兼作选频和反馈网络）和两级共射极阻容耦合放大电路组成。根据由集电极输出的放大器的相位关系，$\dot{V}_{i1}$ 与 $\dot{V}_O$ 是同相位的，因此，要求反馈网络 $\dot{F}$ 所提供的反馈电压 $\dot{V}_f$ 一定要与输出电压 $\dot{V}_O$ 同相位。而 RC 串并网络在特定频率 $f_0=\frac{1}{2\pi RC}$ 时，$\dot{V}_f=\dot{V}_O/3$，即反馈系数 $\dot{F}=\frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_O}=\frac{1}{3}$，相位移为零，可满足相位平衡条件的要求。至于幅度平衡条件是很容易满足的，只需两级放大电路的总电压增益 $A_V=A_{V1}\cdot A_{V2}\geq 3$，即能满足 $\dot{F}\dot{A}_{V0}\geq 1$ 的起振条件。

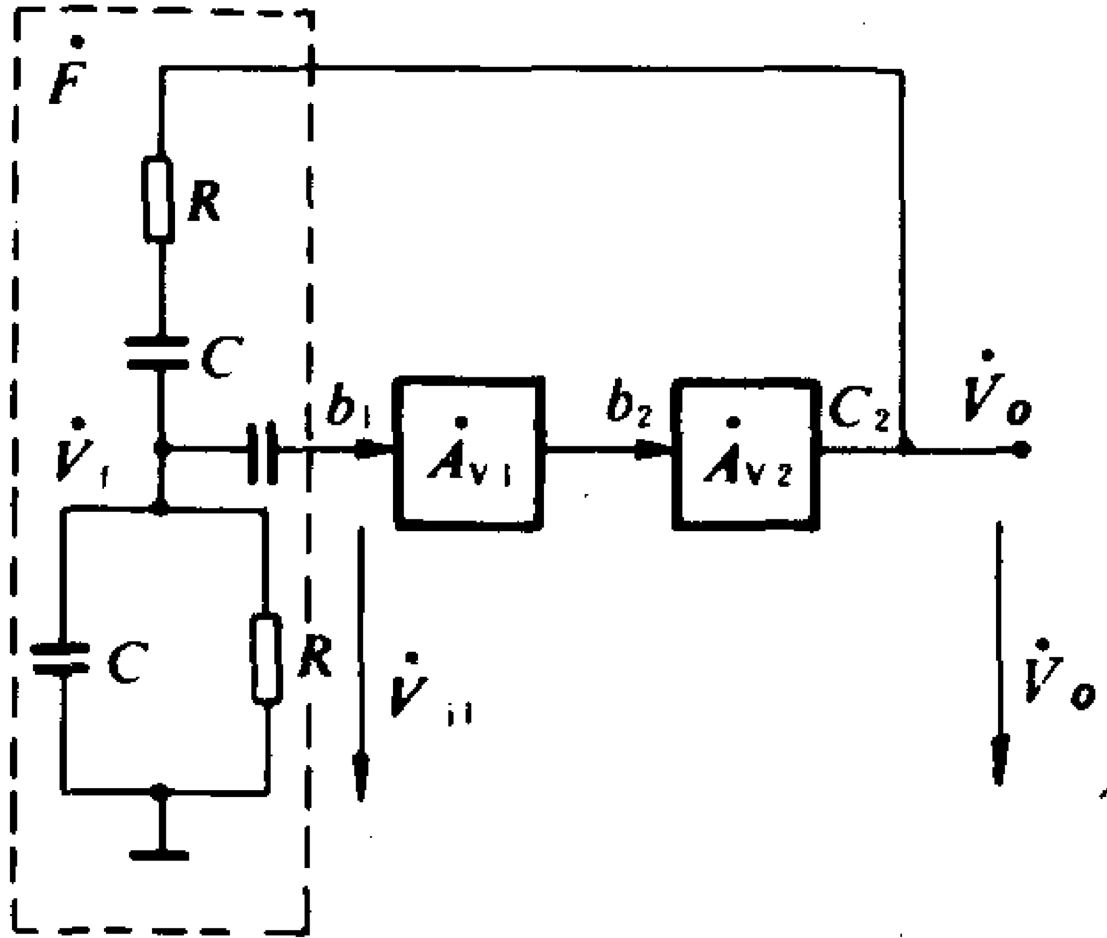


图 1.1.8-67 RC 振荡器一例

$\dot{F}=\frac{1}{3}$ 的证明：

$$\dot{F}=\frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_O}=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}=\frac{\frac{R/j\omega c}{R+1/j\omega c}}{R+\frac{1}{j\omega c}+\frac{R/j\omega c}{R+1/j\omega c}}=\frac{\frac{R}{1+j\omega c}}{R+1/j\omega c+\frac{R}{1+j\omega cR}}$$

$$=\frac{R}{(R+1/j\omega c)(1+j\omega cR)+R}=\frac{1}{3+j(\omega cR-\frac{1}{\omega cR})}$$

$$=\frac{1}{\sqrt{3^2+(\omega cR-\frac{1}{\omega cR})^2}}-\tan^{-1}\frac{\omega cR-\frac{1}{\omega cR}}{3}$$

$= F(\omega) \angle \varphi(\omega)$

式中 $F(\omega)=\dfrac{1}{\sqrt{3^2+(\omega cR-\dfrac{1}{\omega cR})^2}}$；　$\varphi(\omega)=-\tan^{-1}\dfrac{\omega cR-\dfrac{1}{\omega cR}}{3}$ 分别称为反馈系数的幅频特性和相频特性，如图 1.1.8-68 所示。可见，在角频率 $\omega=\omega_0=\dfrac{1}{RC}$ 时，$F(\omega_0)=F_{\max}=\dfrac{1}{3}$，$\varphi(\omega_0)=\varphi_{\min}=0$，因此振荡电路就振荡在这一频率上。且 RC 愈大，振荡频率愈低，通频带 $\Delta\omega=\dfrac{3}{RC}$ 愈窄，选频性能、波形愈好。所以这种振荡器适合产生低频正弦波信号。

5.4.2　RC 单 T 型网络振荡器

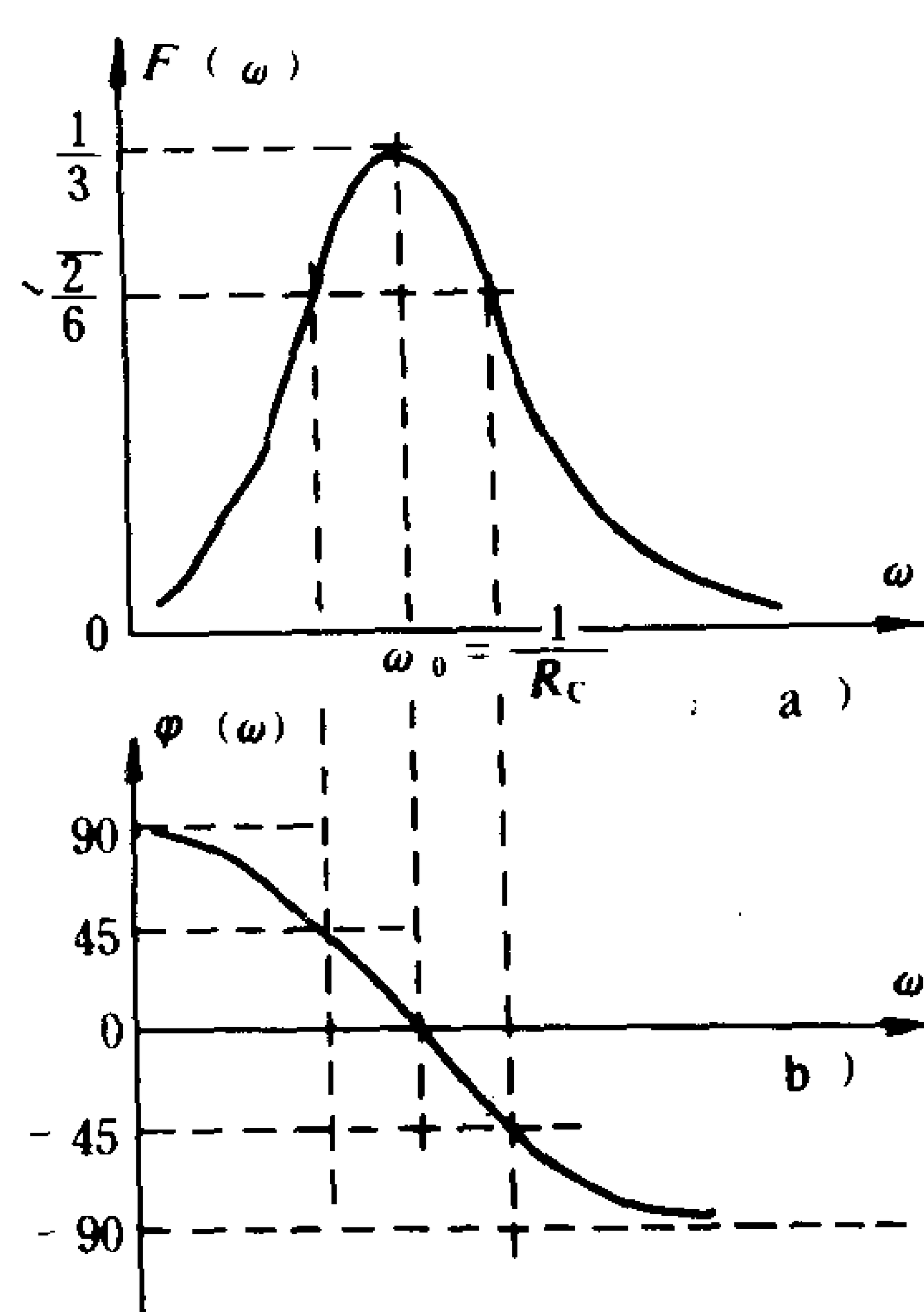


图 1.1.8-68　RC 串并联网络的频率响应
a)幅频特性；b)相频特性

图 1.1.8-69 a) 是 RC 单 T 型网络振荡器。它由 RC 单 T 型网络（兼作选频和反馈电路）和两级共射极阻容耦合放大器组成。根据由集电极输出的放大器的相位关系，$\dot{V}_i$ 与 $\dot{V}_O$ 是同相位的，因此，要求反馈网络 $\dot{F}$ 所提供的反馈信号 $\dot{V}_f$ 一定要与输出信号 V_O 同相位。而 RC 单 T 型网络在特定频率 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{n}RC}$ 时，反馈系数 $\dot{F}=\dfrac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}=\dfrac{n}{n+2}$，为最小值，相位移为零，可满足相位平衡条件的要求。至于幅度平衡条件，只要两级放大器的电压增益 $\dot{A}_v=\dot{A}_{v1}\dot{A}_{v2}\geq 1+\dfrac{n}{2}$，是容易满足 $\dot{F}\dot{A}_{v0}\geq 1$ 的起振条件的。

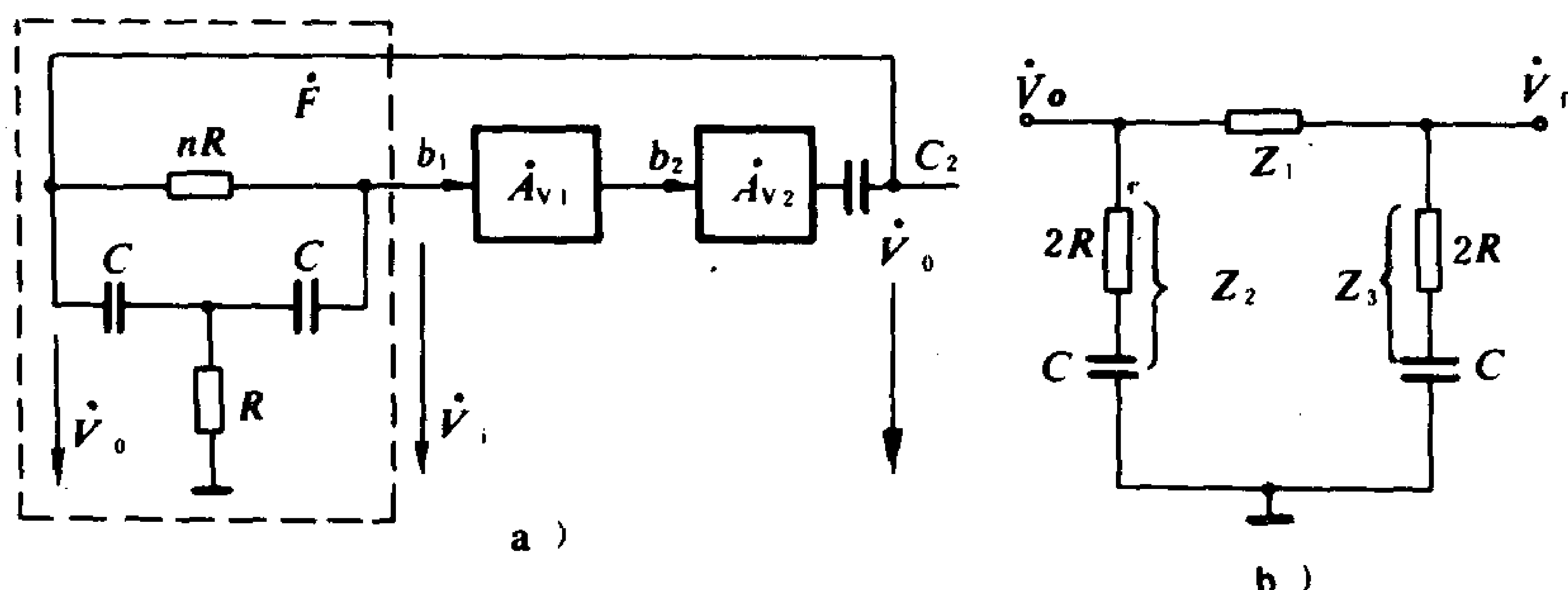


图 1.1.8-69　RC 单 T 网络振荡器
a)振荡器的组成；b)单 T 型变为 π 型

$\dot{F}=\dfrac{2}{n+2}$ 的证明：

首先应用电路原理的 T-π 变换，将图 1.1.8-69 a) 的单 T 网络变为图b) 所示的π 型网络，其中 $Z_1=\dfrac{nR(1+jz\omega CR)}{(1-n\omega^2C^2R^2)+j2\omega CR}$，$Z_2=Z_3=2R-j\dfrac{1}{\omega C}$。

反馈系数：

$$\dot{F}=\frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_0}=\frac{Z_3}{Z_1+Z_3}=\frac{(1-n\omega^2C^2R^2)+jz\omega CR}{(1-n\omega^2C^2R^2)+j(n+2)\omega CR}=F(\omega)\angle\varphi(\omega) \tag{1.1.8-56}$$

当 $\omega_0=\omega=\dfrac{1}{\sqrt{n}RC}$ 时，$F(\omega_0)=F_{\min}=\dfrac{2}{n+2}$，$\varphi(\omega_0)=\varphi_{\min}=0$，反馈系数的幅频特性 $F(\omega)$

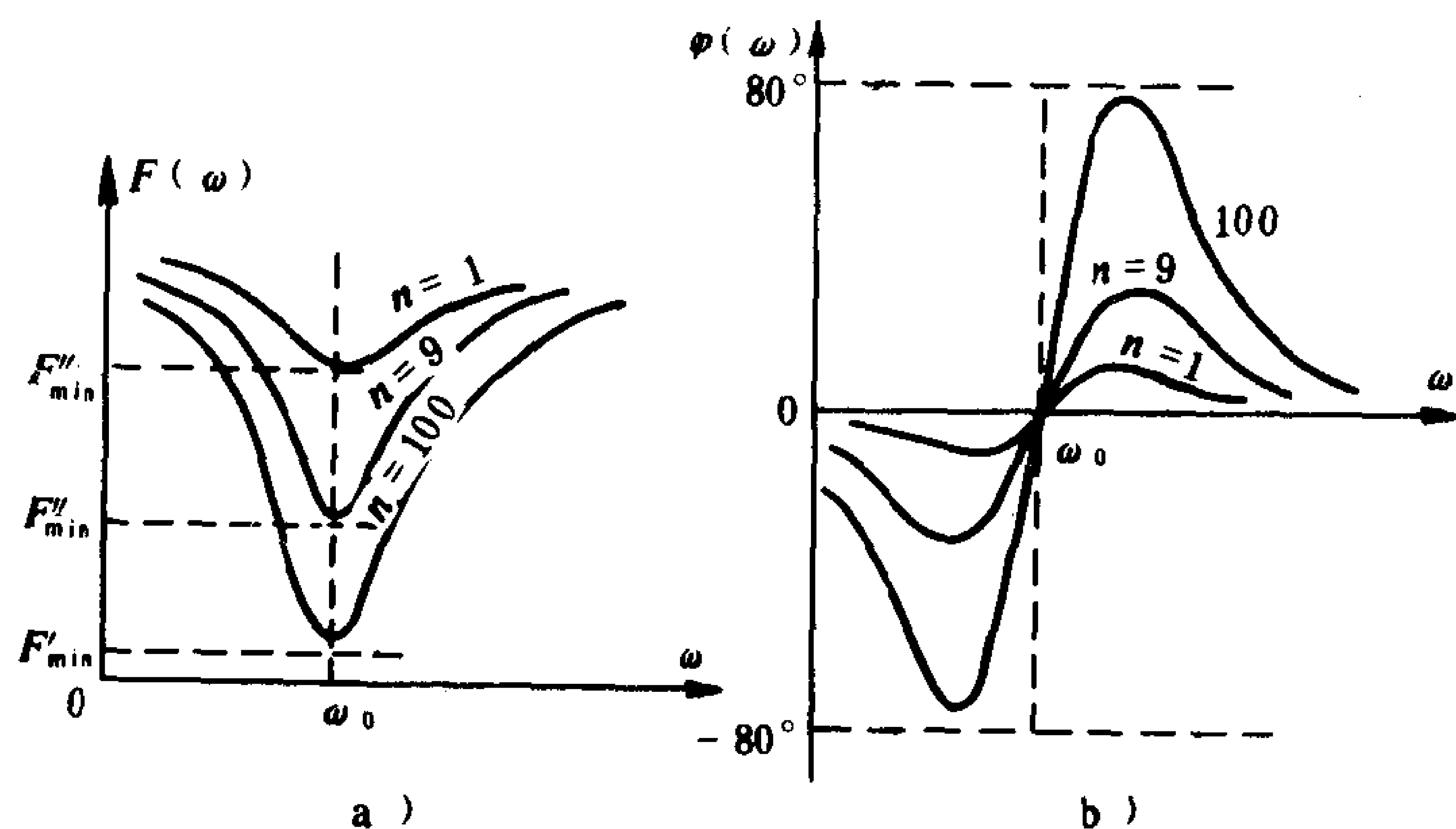


图 1.1.8-70　*RC* 单 T网络的频率响应

a)幅频特性；b)相频特性

和相频特性 $\varphi(\omega)$ 如图 1.1.8-70 所示。跨接于两个电容器上的电阻 nR（即系数 n）愈大，幅频特性愈陡峭，F_{min} 愈小，通频带愈窄，选频性能和波形愈好；而且系数 n 愈大，振荡频率愈低，所以这种振荡器也适合产生低频正弦波信号。

RC 振荡器的形式也很多，表 1.1.8-5 给出了它们的振荡频率、起振条件和应用场所等。

表 1.1.8-5　　*RC* 振荡器

电路型式	180° 单级放大器 *RC* 移相振荡电路	360° 两级放大器 *RC* 串并联选频网络振荡电路	180° 单级放大器 *RC* 双 *T* 型选频网络振荡电路	360° 两级放大器 *RC* 单 *T* 型选频网络振荡电路
振荡频率	$f_0 \approx \frac{1}{2\pi RC}\frac{1}{\sqrt{6+4/n}}$ $n=R/r_i$ r_i 为放大器输入电阻	$f_0=\frac{1}{2\pi RC}$	$f_0 \approx \frac{1}{5RC}$	$f_0=\frac{1}{2\pi RC\sqrt{n}}$ n 为电阻 nR 的系数
起振条件	$\beta>29+\frac{23}{n}+\frac{4}{n^2}$ $n=R/r_i$　同上 β 为晶体管电流放大系数	$\dot{F}_{max}=\frac{1}{3}$ $\dot{A}_v>3$ （未考虑反馈网络降低增益的影响）	在 $R'<0.5R$ 时， $\lvert\dot{A}_v\dot{F}\rvert>1$	$\dot{F}_{min}=\frac{2}{2+n}$ $\dot{A}_v>1+\frac{n}{2}$ n 同上
电路特点及应用场合	电路简单，经济方便，适用于对波形要求不高的轻便测量设备	用双联可变电容可以方便连续改变振荡频率，便于加负反馈稳幅电路，容易获得良好的振荡波形	适用于产生单频率的振荡	同左

6　逻辑门电路

“门”是一种开关，逻辑是指“条件”与“结果”的关系。利用门电路的输入信号，反映“条件”，而用门电路的输出信号反映“结果”；从而使门电路的输入与输出之间具有一定

的逻辑关系，这种电路称之为逻辑门电路。基本逻辑门电路有“与”、“或”、“非”、“与非”、“或非”、“与或非”等多种。

6.1 关于逻辑电路的几个问题

6.1:1 逻辑状态的表示法

逻辑电路输入、输出信号电位的高、低是两个对立的逻辑状态，通常用数字“0”、“1”表示，它们不是数学中表示数量大小的数码，而是作为一种符号表示两种对立的逻辑状态。这样在组成门电路时就可以选用各种具有两种状态的元件（如二极管、三极管、场效应管的开关状态）来组成实现逻辑功能的电路。

6.1.2 正逻辑和负逻辑的规定

正逻辑：用“1”表示高电位，用“0”表示低电位。负逻辑：用“1”表示低电位，用“0”表示高电位。

6.1.3 标准高低电平的规定

在逻辑电路中，电位的高低常用高低电平来描述，电平的单位也是伏特。由于温度的变化，元件特性的变化，电源电压波动等影响，实际的高电平和低电平都不是一个固定数值，所以规定电平的一个变化范围，以此判断“1”或“0”状态。

高电平可在 3～5 V之间波动，低电平可在 0～0.4 V之间波动。在实际应用中，对于各种集成与非门电路规定的高电平的下限值和低电平的上限值，称为标准高电平和标准低电平，标准高电平为 $V_{SH}=2.4$ V，标准低电平为 $V_{SL}=0.4$ V。因此在逻辑系统中应保证输出高电平 $V_{OH}\geq 2.4$ V(其典型值约为 3.5 V)，输出低电平为 $V_{OL}\leq 0.4$ V。如果高电平过低，或低电平过高，都会破坏电路的逻辑功能。

6.2 分立元件门电路

6.2.1 与门电路

与门电路的逻辑关系是：所有输入端信号都是高电位时，输出端才是高电位，如果有一个输入端是低电位，输出则为低电位。

6.2.2 “或”门电路

“或”门电路的逻辑关系是：输入端的信号只要有一个或一个以上是高电位，输出端则为高电位，只有当所有的输入端信号都是低电位时，输出才是低电位。

由二极管组成的“与”门，“或”门电路，逻辑符号及逻辑真值表、逻辑表达式列于表1.1.8-6。表中“与”、“或”门电路都属正逻辑关系。从它们的逻辑真值表中不难看出，如果输入、输出的状态以负逻辑表示，则正逻辑“与”门将是负逻辑的“或”门，而正逻辑“或”门则成为负逻辑的“与”门。可见，“与”和“或”的概念是相对的。一般状况如无加以说明，其逻辑关系都是对正逻辑而言。

6.2.3 “非”门、“与非”门、“或非”门

在逻辑关系中，“非”就是否定或相反的意思，输入为高电平时，输出则为低电平，反之则相反。非的表达式是在字母符号上加一横线，A的非就是$\overline{A}$；“与非”门是由一级“与”门和一级“非”门串接而成；“或非”门也是由一级“或”门和一级“非”门串接而成。表1.1.8.7列出了它们的电路、逻辑符号、逻辑真值表及表达式。

表 1.1.8-6　　二极管组成的“与”“或”门电路

	二极管组成的电路图	符　号	逻辑关系真值表	逻辑表达式
“与”门				$L=A\cdot B\cdot C$
“或”门				$L=A+B+C$

表 1.1.8.7　　“非”、“与非”、“或非”门电路

	电 路 图	逻 辑 符 号	逻辑关系真值表	逻辑表达式
“非”门				$L=\overline{A}$
“与非”门				$L=\overline{A\cdot B\cdot C}$
“或非”门				$L=\overline{A+B+C}$

6.3　双极型集成门电路

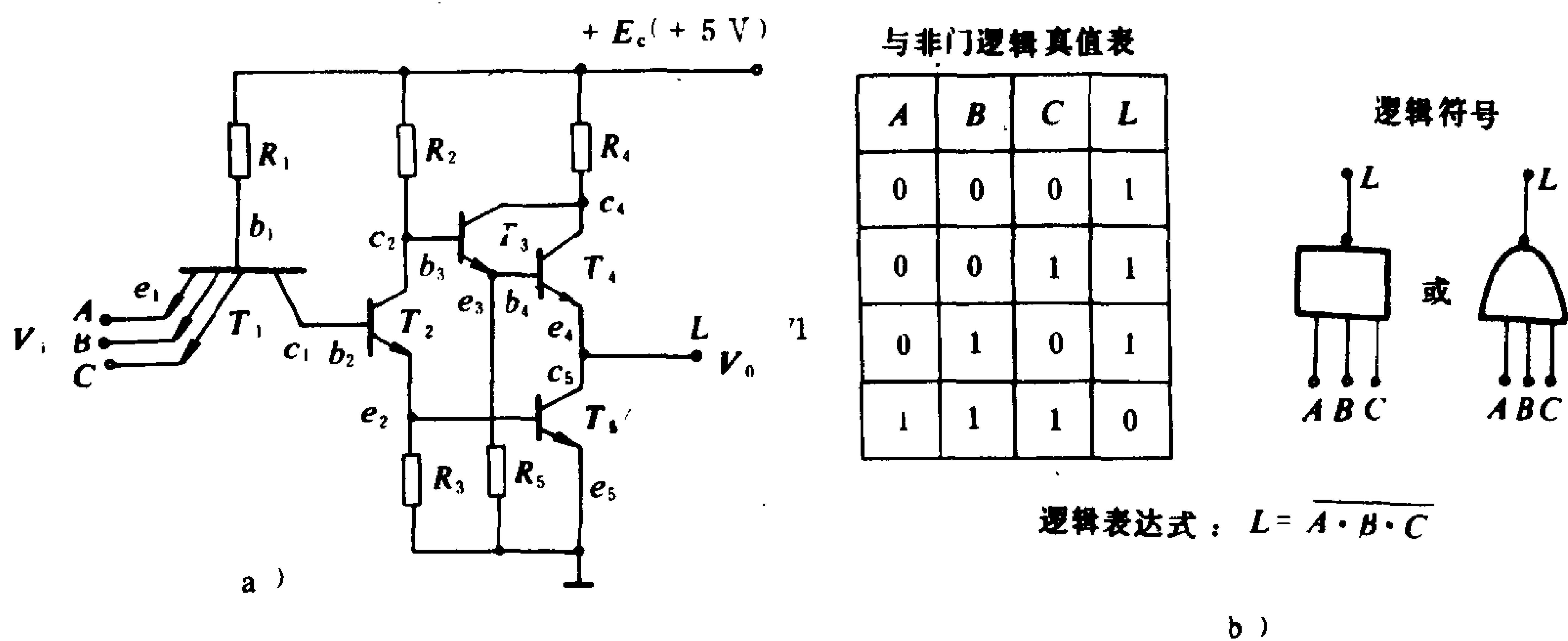
双极型集成门电路是采用多数载流子和少数载流子同时导电的晶体管作为基本元件，集成在一块硅片上，并且具有一定逻辑功能的电路。根据集成度（单位面积的半导体基片上包含元件数量的多少），可分为如表 1.1.8-8 所列类型。

目前常用到的双极型集成电路有TTL电路（晶体管—晶体管逻辑电路）；ECL电路（发射

极耦合逻辑电路)；HTL电路(高阈值逻辑电路)、I^2L(集成注入逻辑电路)等。其中以TTL电路应用较为广泛。

表 1.1.8-8　　　　TTL电路分类

类　　型	集 成 度
小规模集成电路(SSI)	可包含十几个门电路的全部元器件和连线
中规模集成电路(MSI)	可包含几十个至几百个门电路的全部元器件和连线
大规模集成电路(LSI)	可包含几百至几千个门电路的全部元器件和连线
超大规模集成电路(VLSI)	包含一万个以上门电路的全部元器件和连线



A	B	C	L
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
1	1	1	0

图 1.1.8-71　TTL与非门电路

a)TTL与非门电路原理图；b)TTL与非门逻辑真值表，符号表达式

6.4 TTL与非门

图 1.1.8-71 a) 所示为TTL与非门的典型电路。其工作原理是：当输入端有一个(或几个)接低电平(+0.3 V)时，T_1(多发射极三极管)的基极被箝位在 1 V，这时T_1处于饱和状态，V_{c1}的电平大约只有 0.4 V左右，因此T_2、T_5截止，从E_c经 R_2、T_3和T_4的发射结到负载，将有电流流过，输出为高电平。当输入端全部为高电平时(+3.6 V)，T_1所有发射结都处于反偏，而集电结正好是正向偏置，T_1处于集电极、发射极"倒置"工作状态，电源E_c通过R_1和T_1的集电结向T_2、T_5提供基极电流，使T_2、T_5处于饱和导通，输出为低电平(此时T_3微导通，T_4截止)。该电路实现"与非"门的逻辑功能，其结论是：当输入端有一个(或几个)接低电平时，输出则为高电平，只有输入端全部接高电平，输出端才是低电平。图 1.1.8-71 b) 为其逻辑真值表及逻辑符号、表达式。

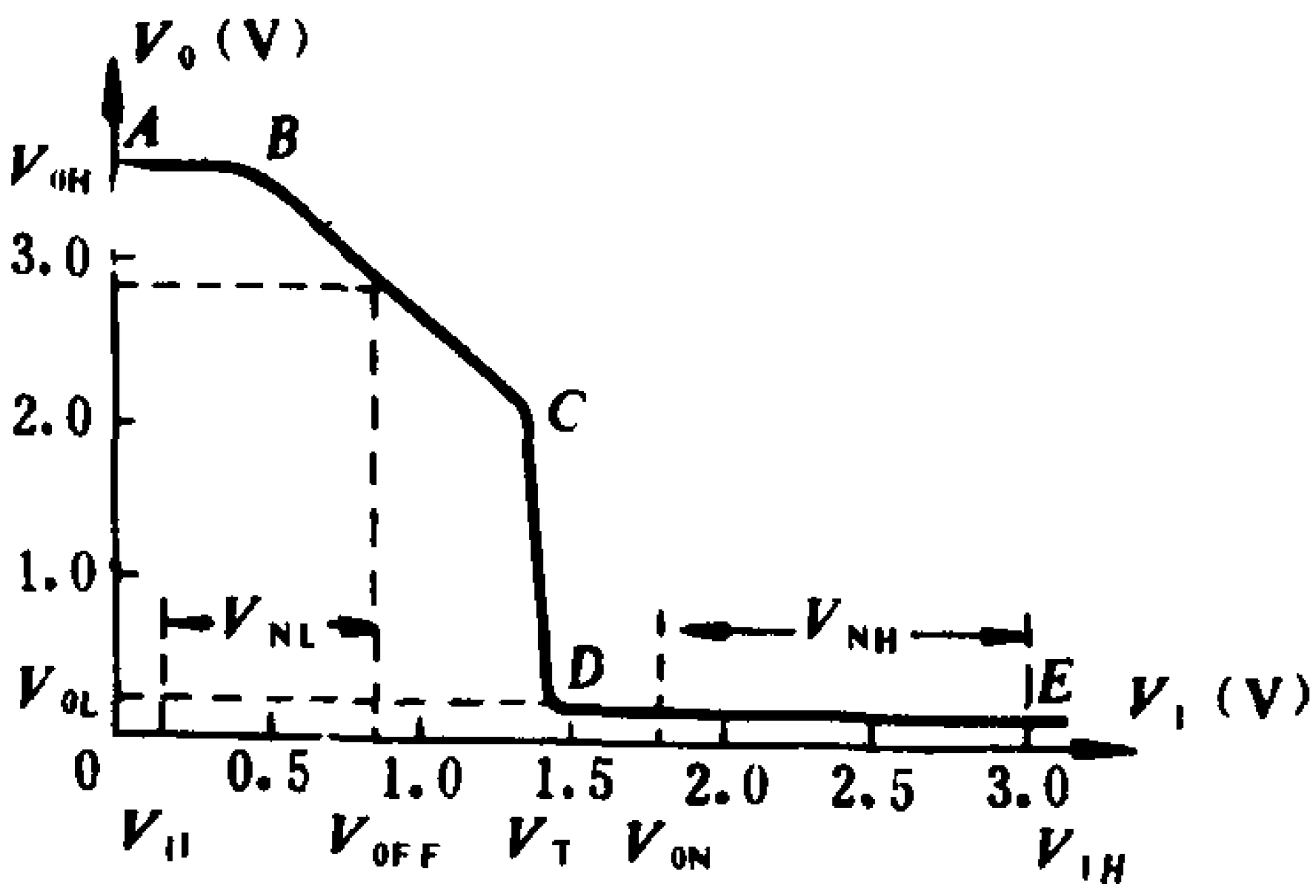


图 1.1.8-72　TTL与非门传输特性曲线

6.4.1 TTL与非门电压传输特性

TTL与非门电压传输特性曲线，如图1.1.8-72 所示，按曲线的变化规律可分为 4 段分析：(1) AB段：V_i从 0 增加到≤0.6 V，输出电压V_o保持

高电平V_{OH}，与非门处于截止状态；（2）BC段：V_I从0.6 V增加到1.3 V，V_o随之线性减小，称为电压传输特性的线性区；（3）CD段：V_I增加到1.4 V左右时，随V_I的增加，V_o下降速度很快，并迅速到达低电平V_{OL}；（4）DE段：输出电压V_o不再随V_I变化而变化，与非门处于饱和状态。

6.4.2 TTL与非门的主要指标

1)输出高电平V_{OH}　V_{OH}是指TTL与非门有一个（或几个）输入端为低电平时其输出端的电平。即图1.1.8-72上AB段的输出电压值。

2)输出低电平V_{OL}　V_{OL}是指TTL与非门输入端全部接高电平时其输出端电平。即图1.1.8-72上DE段的输出电压值。测定V_{OL}时，应在额定负载下进行。产品规范值$V_{OL} \leq 0.4$ V，标准低电平$V_{SL}=0.4$ V。

3)门槛电压　也称阈值电压，如图1.1.8-72所示，电压传输特性曲线的转折区所对应的输入电压，一般为1.4 V，用V_T表示。V_T是一个很重要的参数，在近似分析估算中，常把它作为决定TTL与非门工作状态的关键值。当$V_I > V_T$时，就认为“与非”门饱和，输出低电平；当$V_I < V_T$时，就认为“与非”门截止，输出高电平。

4)关门电平和开门电平　关门电平V_{OFF}，是指在保证输出为额定高电平的90%的条件下，允许的最大输入低电平，图1.1.8-72的特性曲线中$V_{OFF}=0.8$ V(以3 V为额定高电平)。开门电平V_{ON}，是指在保证输出为额定低电平时，所允许的最小输入高电平值，图1.1.8-72曲线中$V_{ON}=1.8$ V。关门电平，开门电平也是两个经常应用的概念，它们具体表明了在正常工作状况下，输入信号电平变化的极限值。要使“与非”门可靠地截止，使之输出高电平，则V_I必须小于V_{OFF}，而要“与非”门可靠地饱和，使输出为低电平，V_I必须大于V_{ON}。

5)输入信号噪声容限　噪声容限分为低电平和高电平噪声容限。低电平噪声容限是指在保证输出高电平不低于额定值的90%的前提下，允许叠加在输入低电平的最大噪声（干扰）电压，用V_{NL}表示。如果$V_{OFF}=0.8$ V，V_{IL}（输入低电平）$=0.35$ V时，则低电平噪声容限$V_{NL}=0.8-0.35=0.45$ V。高电平噪声容限是指在保证输出为低电平的前提下，所允许叠加在输入高电平上（极性和输入信号相反）的最大噪声（干扰）电压，用V_{NH}表示。如果开门电平$V_{ON}=1.8$ V，输入高电平$V_{IH}=3$ V，则高电平噪声容限$V_{NH}=3-1.8=1.2$ V。在集成门电路中，经常以噪声容限的数值，定量地说明门电路抗干扰能力的大小，噪声容限大，说明

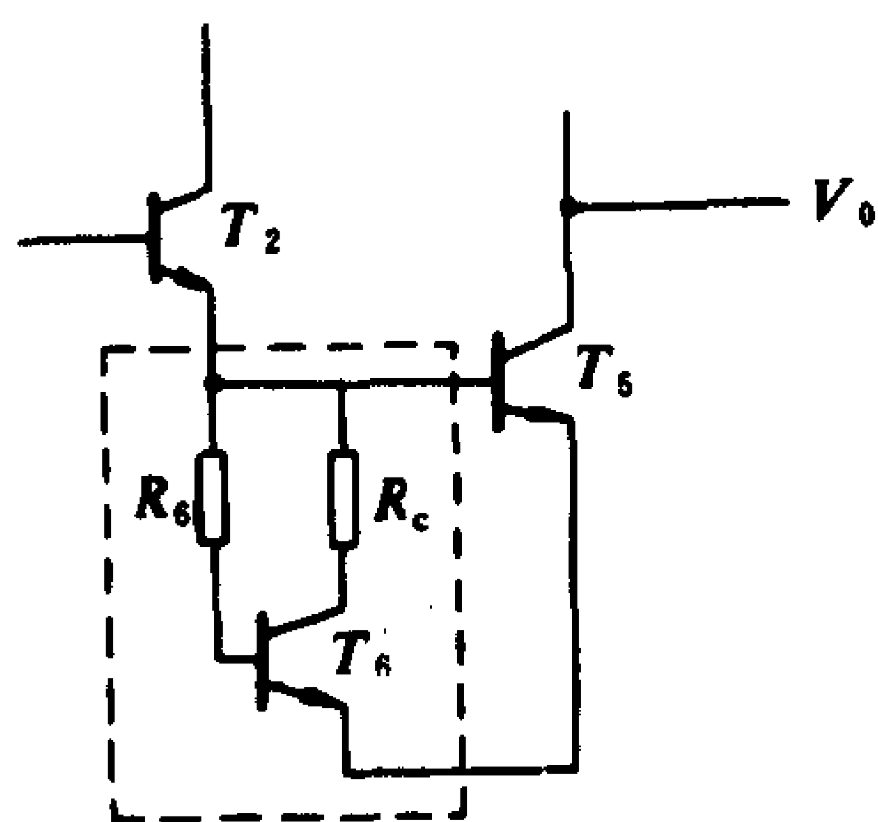


图1.1.8-73　引入有源泄放电路

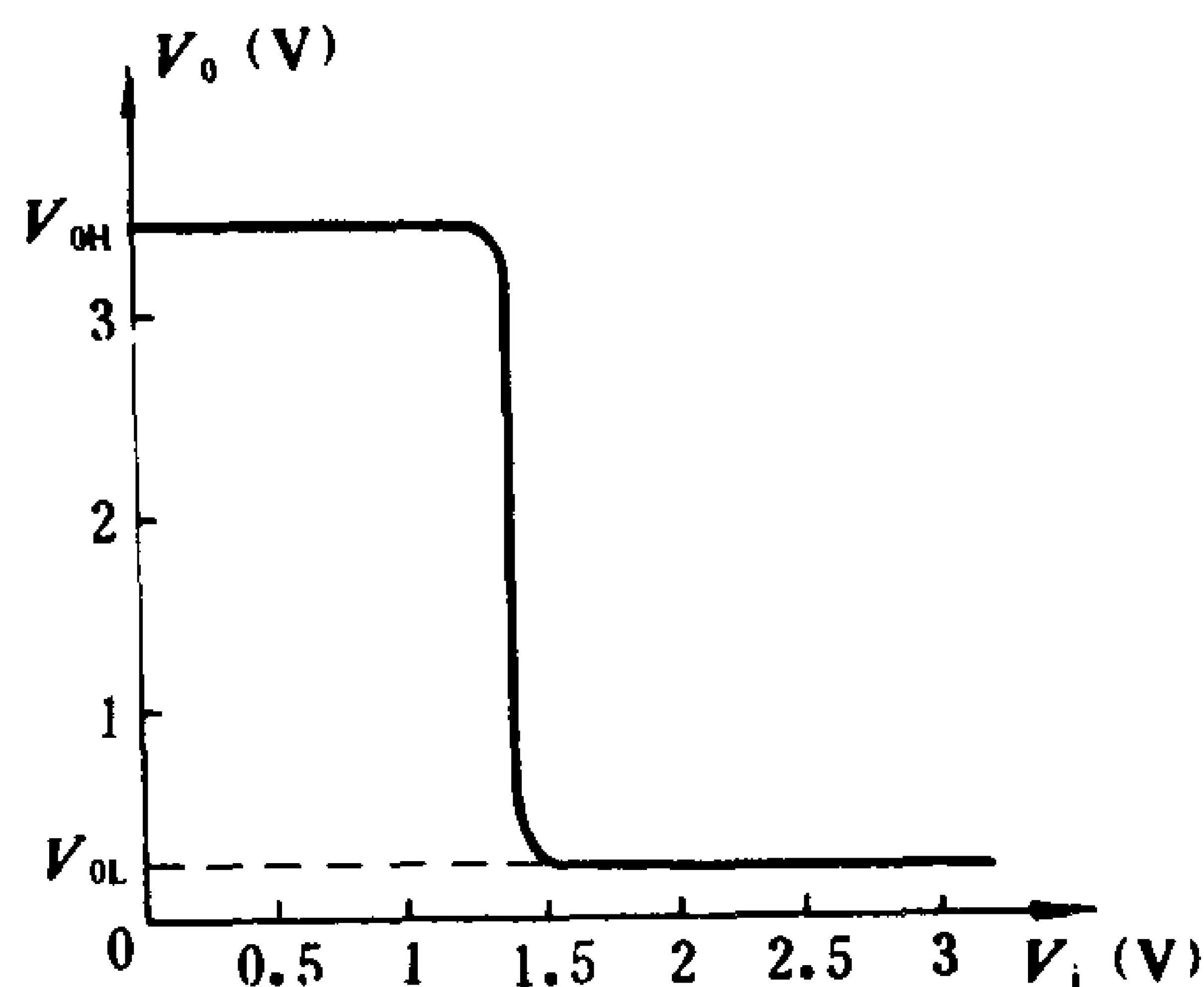


图1.1.8-74　有源泄放TTL与非门电路电压传输特性曲线

抗干扰能力强。在数字电路系统中，如果使用那些噪声容限低的门电路，外界的干扰（这是很难避免的），就会导致整个系统功能的混乱。所以噪声容限也是衡量门电路质量好坏的重要指标。

如果将图 1.1.8-71 a)的TTL电路中的R_3用T_6、R_6、R_c构成的有源泄放电路代替(见图 1.1.8-73 虚线框)，其电压传输特性曲线成为图 1.1.8-74 所示的曲线，这里不存在线性区，因此低电平噪声容限要比典型的TTL电路高得多，可达 1 V左右。V_{NL}、V_{NH}只反映电路允许接受多大的干扰信号，但不能反映电路是否容易接受干扰信号，因为门电路的输入阻抗对接受干扰有很大影响，输入阻抗越大，越容易接受干扰，因此衡量一个“与非”门的抗干扰能力，除了要求有较大的V_{NL}、V_{NH}外，还要求有较低的输入阻抗。为了尽可能地减少噪声影响，通常在电源线上接入旁路电容。

6)扇出系数N_o 它表示以同一型号的“与非”门作为负载时，一个“与非”门所能驱动同类“与非”门的最大数目。它可按下式求出：$N_o=\frac{I_L}{I_{is}}$。式中I_L是“与非”门输出低电平时允许“灌”入的最大负载电流。I_{is}是输入短路电流(当一个输入端接地，而其余输入端开路时流经这个输入端的电流)，此电流即为一个被驱动的“与非”门对驱动的“与非”门灌入的负载电流。产品规定所带“与非”门个数$N_o\geq 8$。

7)平均传输延迟时间t_{pd} 当“与非”门输入一个方波信号时，其输出波形如图 1.1.8-75 所示。输出电压对输入电压有一定的延迟时间，从输入波形上升沿的中点到输出波形下降沿的中点之间的时间延迟称为导通延迟时间t_{rd}；从输入波形下降沿中点到输出波形上升沿中点之间的时间延迟称为截止延迟时间t_{fd}；平均传输延迟时间定义为t_{rd}和t_{fd}的平均值即：$t_{pd}=\frac{1}{2}(t_{rd}+t_{fd})$，它是用来表示电路开关速度。$t_{pd}$的数值很难准确计算，所以一般都是用实验的方法测定。TTL中速“与非”门规范值为 40 ns。

如果TTL电路采用带有肖特基二极管箝位的三极管(其电路连接方式及符号见图 1.1.8-76 a)、b) 称SBD TTL电路（简称STTL)，其平均传输延迟时间则为 2～4 ns。

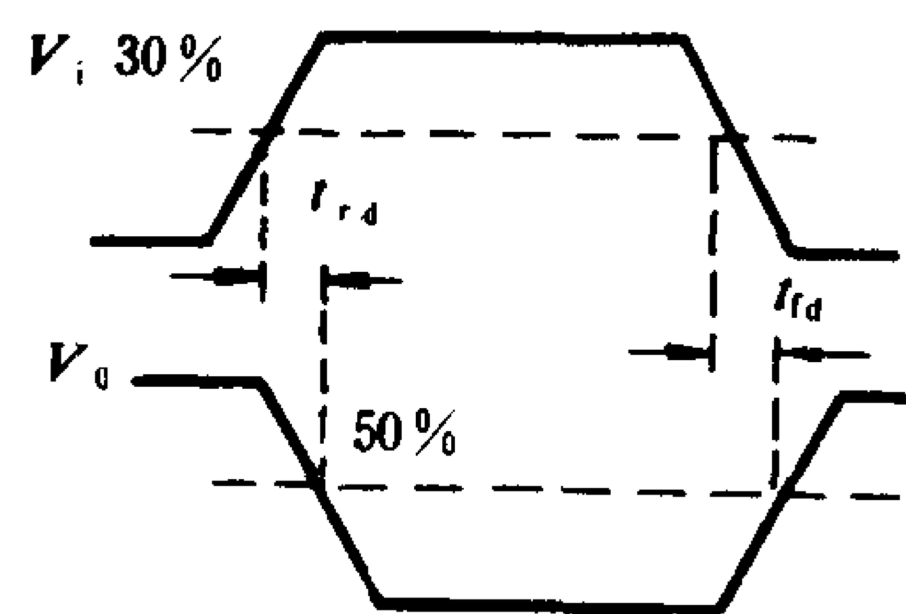


图 1.1.8-75
平均传输延迟时间的定义

6.4.3 温度及电源电压对TTL电压传输特性的影响

在一般工作环境下，影响电压传输特性的主要因素是环境温度和电源电压的变化。温度变化的影响见图 1.1.8-77。总的趋势是：当温度升高时，V_{OH}、V_{OL}升高，V_T降低。因为三极管的V_{BE}有着约为$-2.2\sim-2.5$ mV/℃的温度系数。电源电压变化对电压传输特性的影响，如图 1.1.8-78 所示，V_{OH}随电源电压E_c的升高而升高，且$\Delta V_{OH}=\Delta E_c$。

6.4.4 TTL门电路的其它类型

TTL门电路的系列产品中，除了与非门以外，常用的还有或非门、与或非、与门、或门、异或门、集电极开路门以及三态门等。虽然门的种类很多，但基本电路还是与非门，只是由与非门稍加改动或由与非门的若干个部分组合而成，有的就是与非门电路的一部分。

1)与或非门 图 1.1.8-79 a)是一个“与或非”门的电路图。T_2和T_2'的输出端在p、Q两点是并联在一起，它们当中的任何一个导通，都可以使T_5饱和导通、T_4截止，输出为低电平。只有T_2、T_2'同时截止，输出才能是高电平。这样的逻辑关系即为“与或非”。

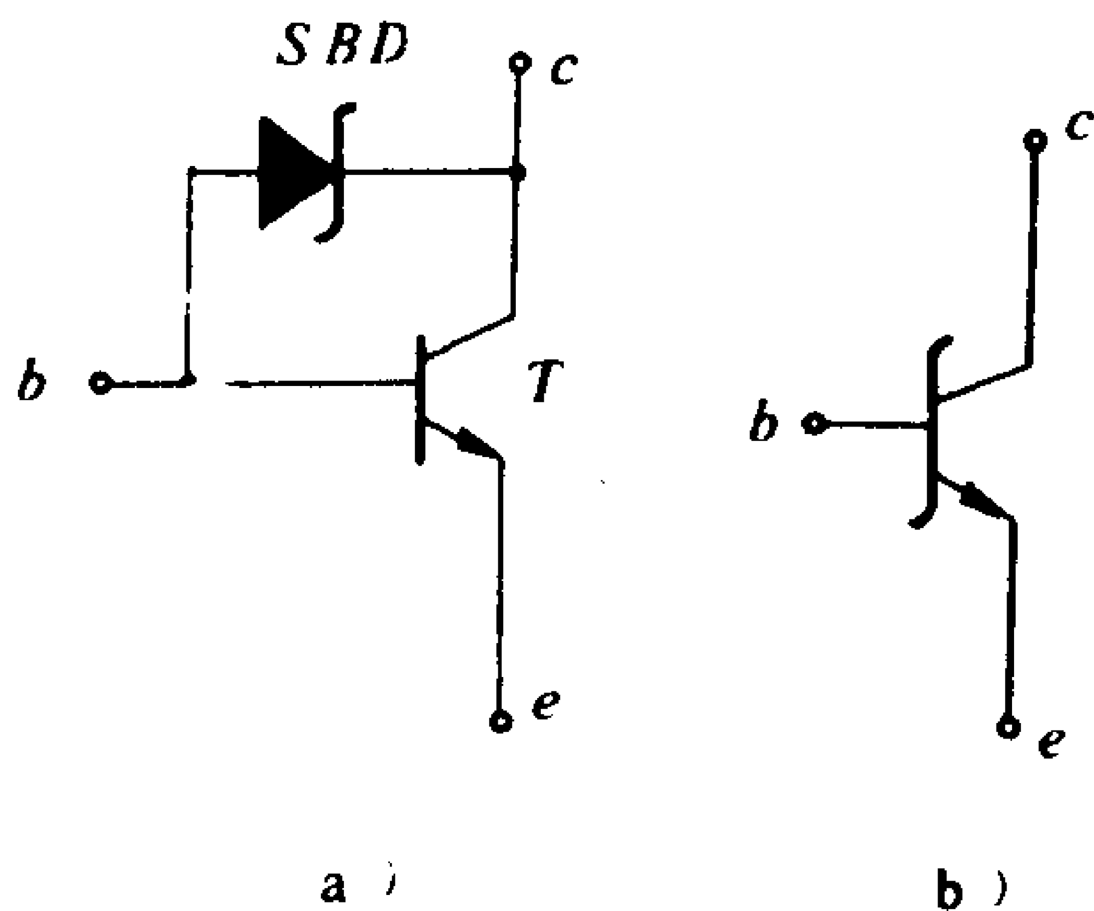


图 1.1.8-76 带有肖特基二极管箝位的三极管

a)电路连接方式；b)符号

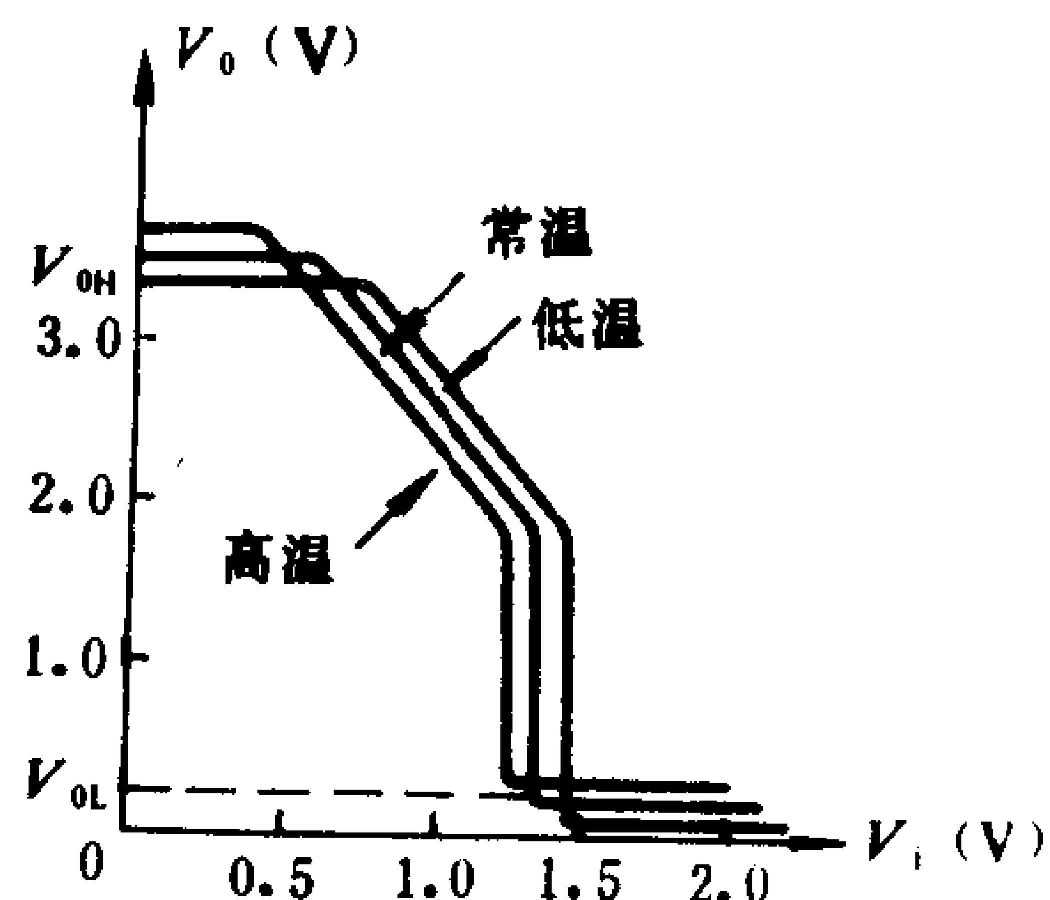


图 1.1.8-77 温度变化对电压传输特性的影响

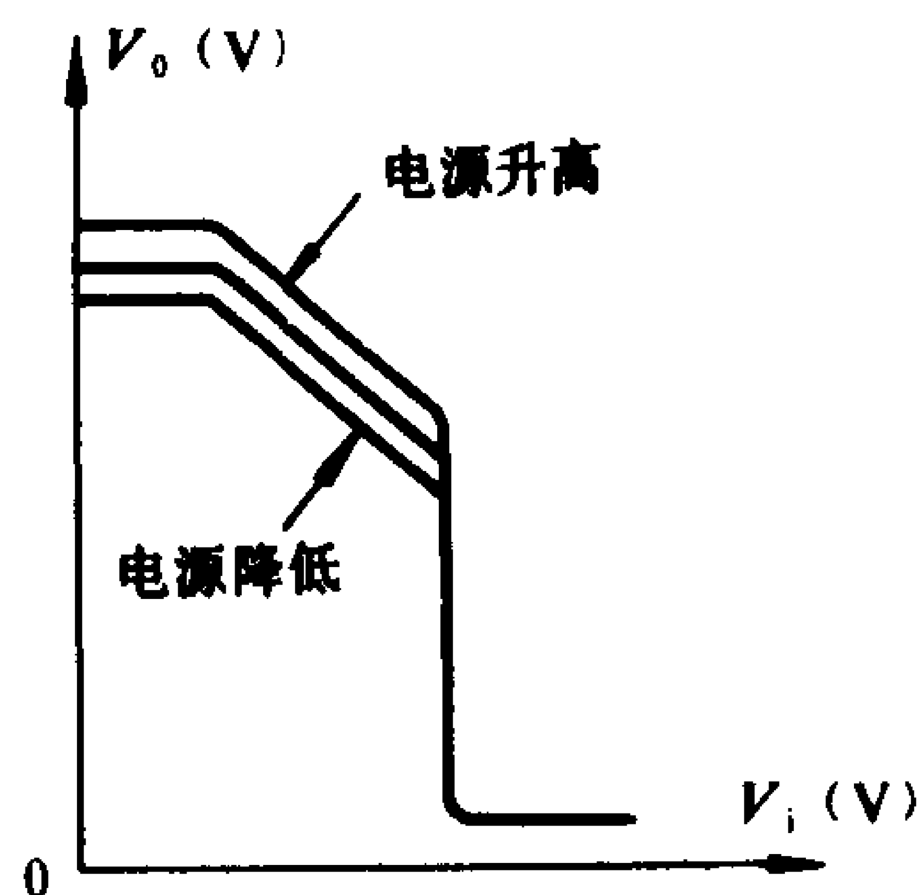


图 1.1.8-78 电源电压变化对电压传输特性的影响

图 1.1.8-79 b）为其逻辑符号和逻辑表达式。

2)异或门 “异或”关系是指两个输入信号在它们相同时输出低电平，而不同时输出为高电平。图 1.1.8-80 a)、b)、c）分别为“异或”门的电路，逻辑真值表，逻辑符号及表达式。这个电路中虚线右边部分和一般与非门的中间级、输出级基本相同，稍微不同的是中间级，它由T_6和T_7并联组成，所以，T_6和T_7当中任何一个饱和导通时，输出都是低电平。

3)集电极开路与非门 在TTL与非门中，输出级的电路形式无论是输出高电平或是输出低电平，它的输出电阻都是很低的。因此，在用“与非”门组成逻辑电路时，不能用直接把两个门的

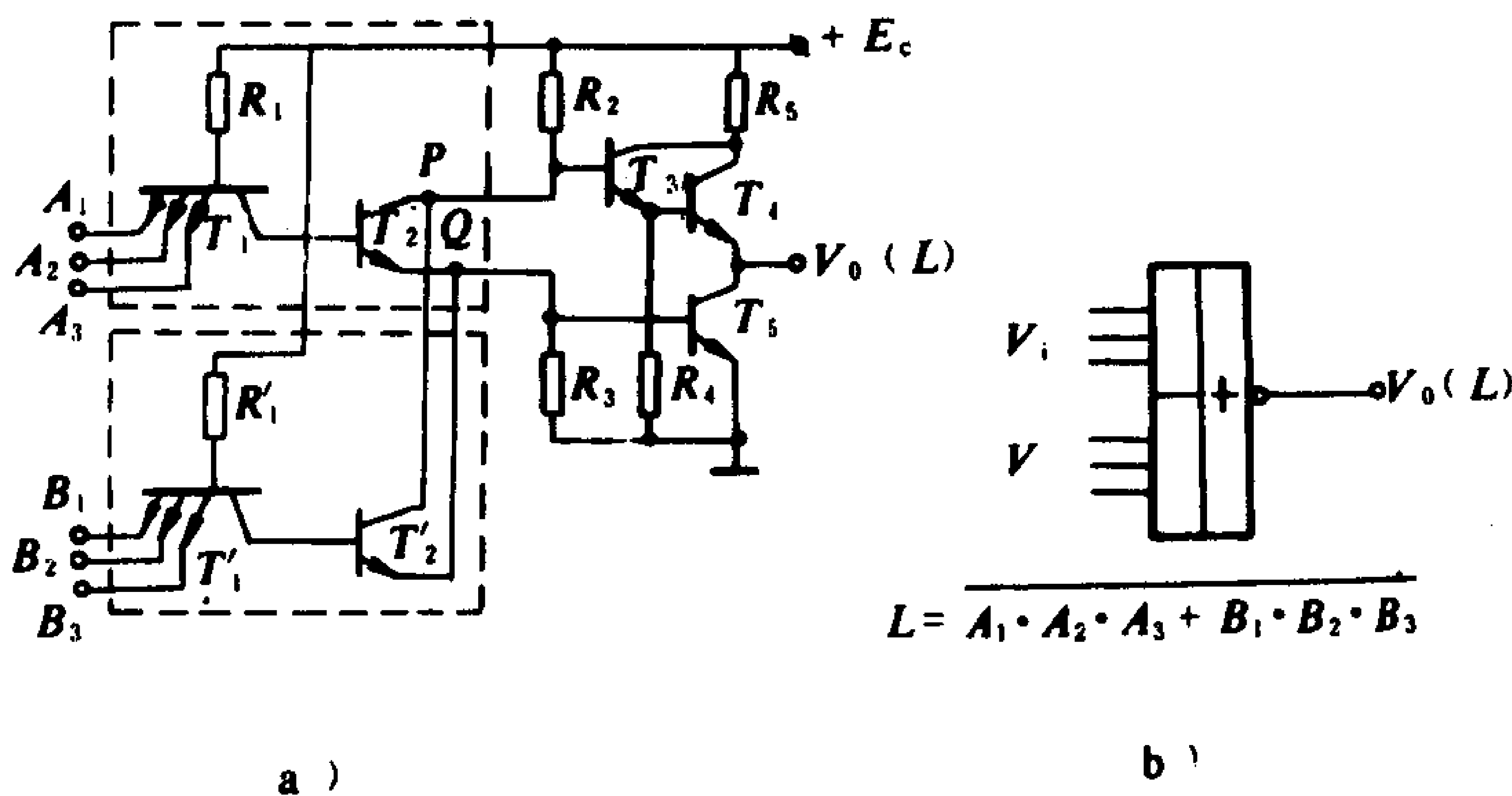
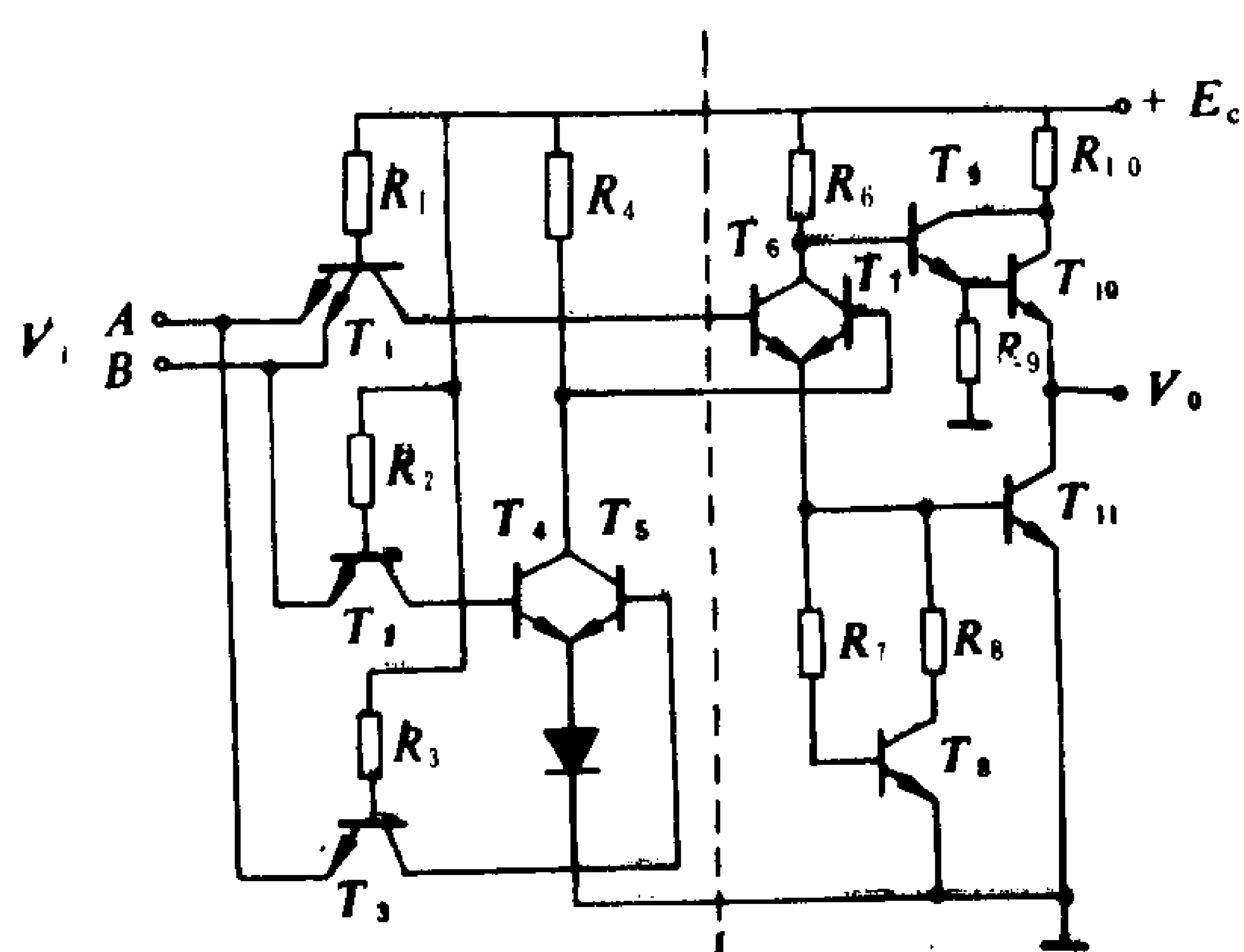


图 1.1.8-79 TTL与或非门

a)电路图；b)逻辑符号及表达式

输出端连在一起的方法来实现这两个输出信号之间“与”的逻辑关系。利用集电极开路与非门就可以实现线与的逻辑关系。图 1.1.8-81 a）是一个典型的集电极开路与非门电路。由于它的输出管T_5的集电极是悬空的，故称之为集电极开路与非门。图 1.1.8-81 b）为其逻辑符号。



A	B	Z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

b）

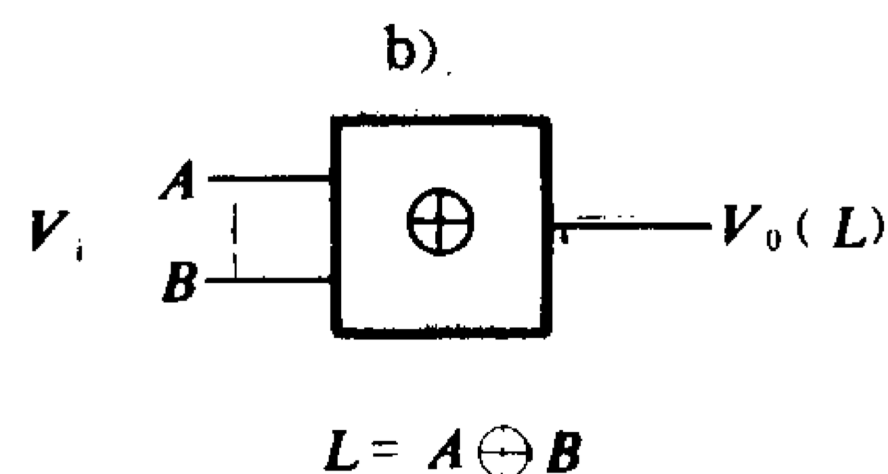
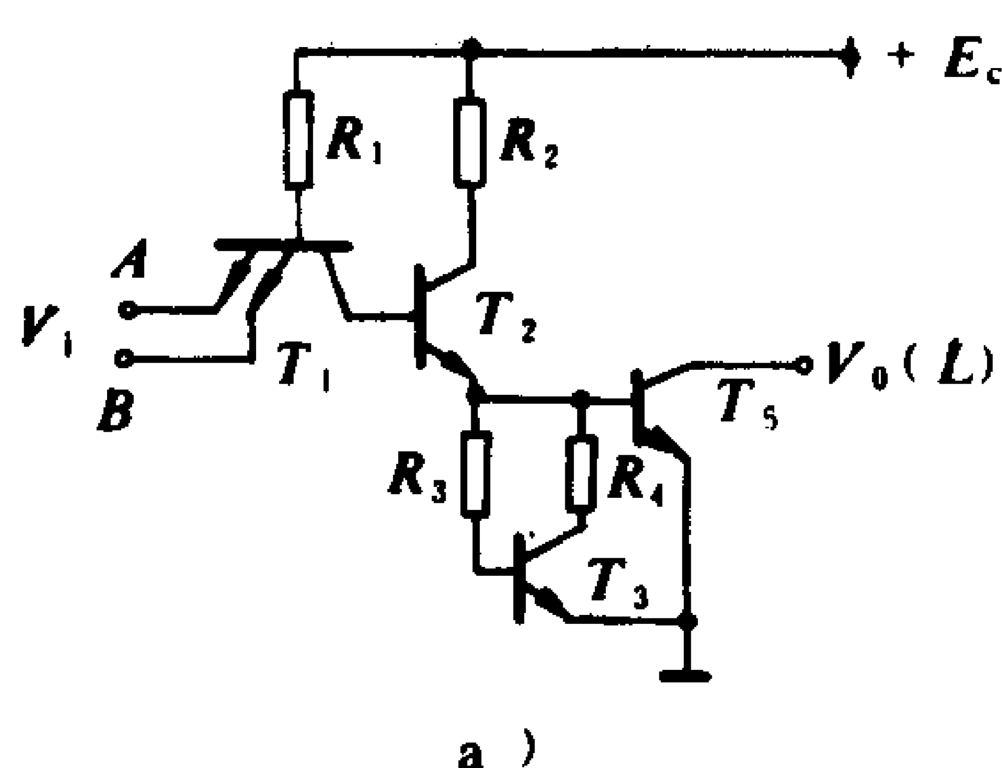


图 1.1.8-80　TTL异或门电路

a)电路原理图；b)逻辑真值表；c)逻辑符号、表达式

4)三态输出与非门(TS输出电路)　该电路的输出端除了可以实现高电平、低电平的逻辑关系之外，还可以出现第三种状态—高阻抗状态（或称禁止状态)。图 1.1.8-82 是一个三态门电路。C为控制端，当C接低电平时，将按照“与非”逻辑关系把信号A、B传送到输出端。其输入与输出的逻辑关系为：$L=\overline{A\cdot B}$。当C端接高电平时，输出级的三极管都截止，电路处于高阻抗状态，相当于和总电路断开。图 1.1.8-83 是三态输出与非门的逻辑符号。其中图b) 表示C端接低电平时为工作状态，C端有小圆圈；图a) 表示C端接高电平时为工作状态，d端无小圆圈。三态门最重要的一种用途是：可以实现用同一根导线轮流传送几个不同的数据或控制信号，如图 1.1.8-84 所示。这种门电路在现代电子计算机中应用极为广泛，特别在规模较大的系统中普遍应用。



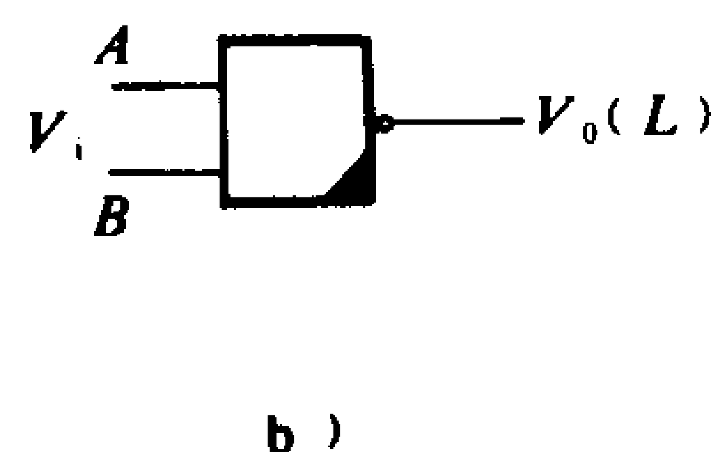


图 1.1.8-81　集成开路与非门

a)电路原理图；b)逻辑符号

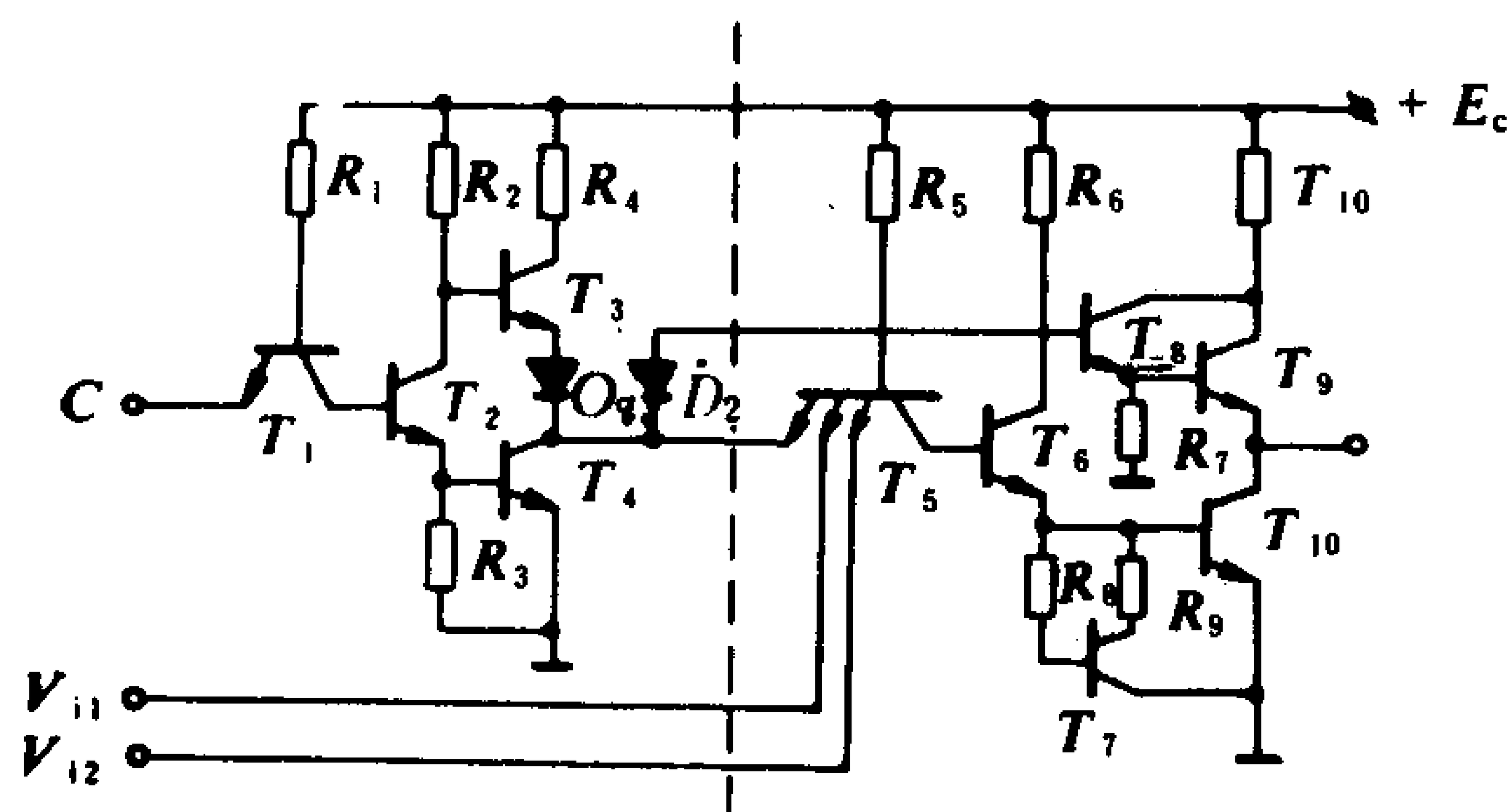


图 1.1.8-82　三态输出与非门电路

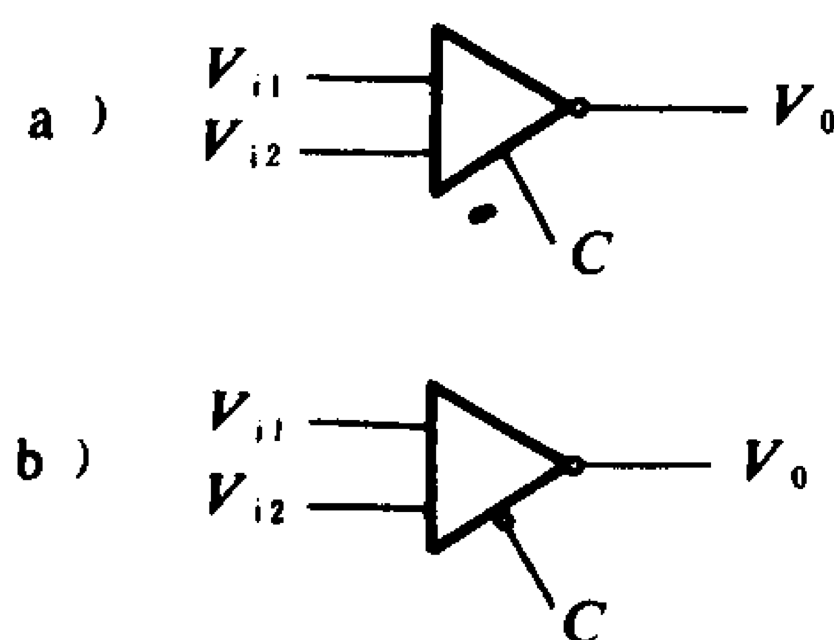


图 1.1.8-83　三态输出与非门的逻辑符号

a)c端接高电平为工作状态；b)c端接低电平为工作状态

6.4.5　改进型TTL与非门

TTL电路速度快，功耗低，是目前双极型集成逻辑门中应用较广泛的一种电路。随着科

学技术和生产的发展，对集成与非门的速度、负载能力、功耗等指标提出越来越高的要求，从而出现了一系列改进型TTL与非门。

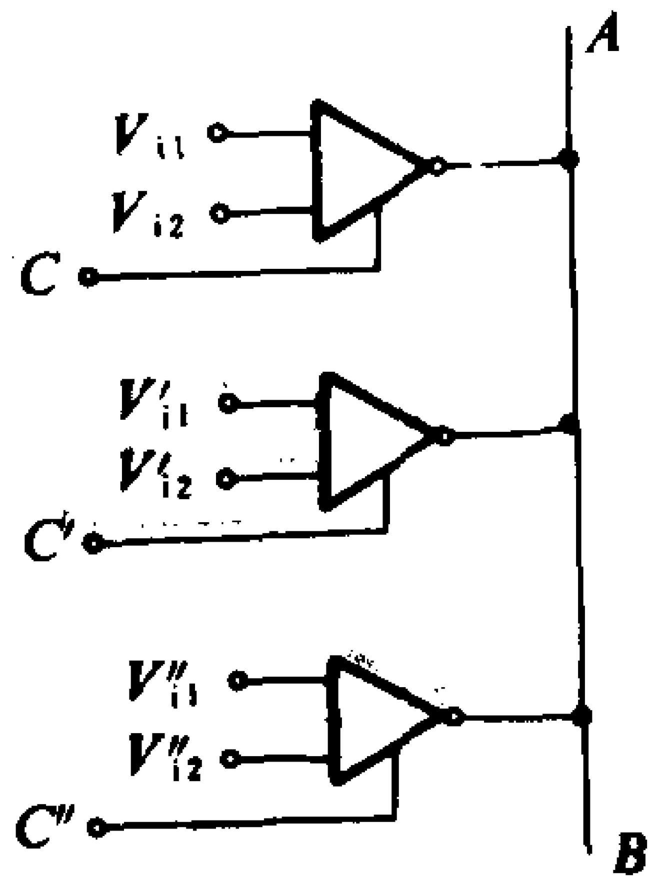


图 1.1.8-84　三态输出与非门的应用举例

1)高阈值逻辑门（HTL）（High Threshold Logic 的缩写）

它是一种专为工业控制设备而设计的高抗干扰逻辑电路。其 V_{NL}、V_{NH}均可达到 5.5 V。其主要缺点是工作速度较低，功耗较大。基本电路如图 1.1.8-85 所示。这种门电路的电源电压较高，一般为 15 V。

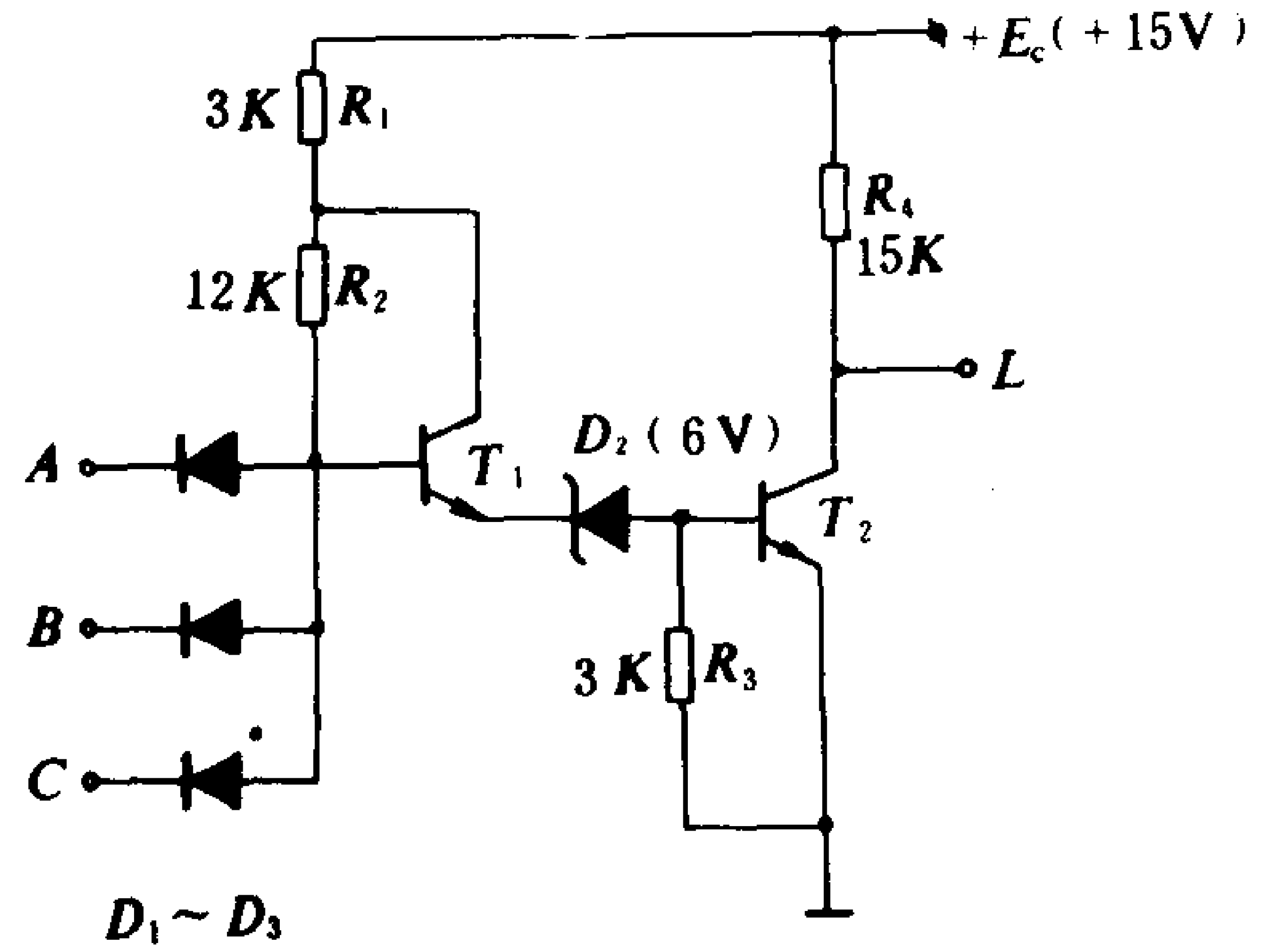
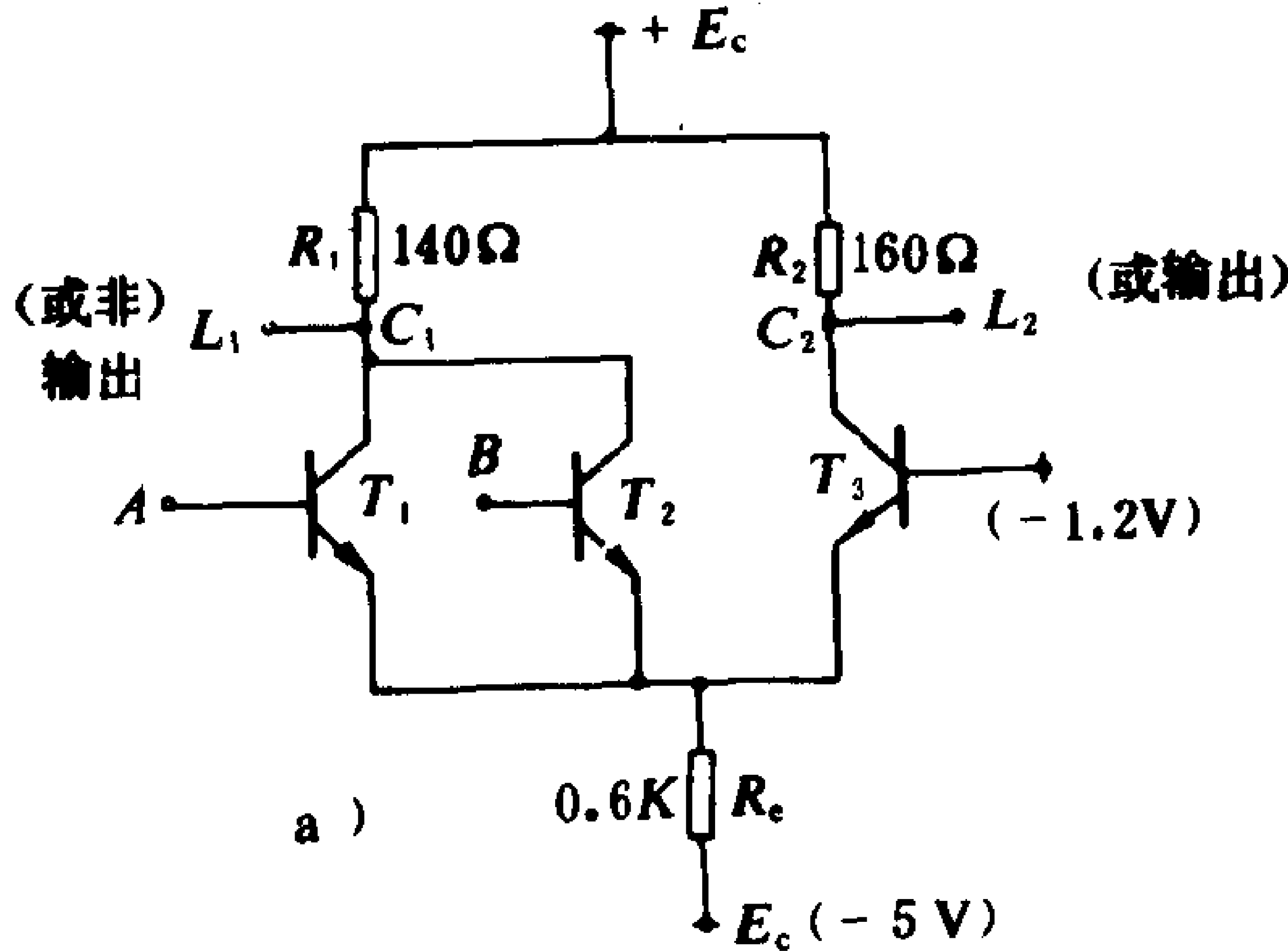


图 1.1.8-85　基本HTL与非门电路

2)射极耦合逻辑电路（ECL）(Emitter Coupled Logic 缩写)

它是一种高速数字集成电路。其基本电路及逻辑符号如图 1.1.8-86 所示。它有两个输出端：$L_1=\overline{A+B}$；$L_2=A+B$。可见它的基本逻辑功能是同时具备或非/或输出，称之为互补逻辑输出。由于它的工作速度快，所以主要用于大型高速电子计算机，宇航卫星通信设备及其它高速系统。它的主要缺点是制造工艺要求高，功耗大，抗干扰能力较弱。

3)集成注入逻辑门（I^2L）(Integrated Injection Logic 的缩写) 它是一种由多集电极三极管构成的数字集成电路。其基本电路及逻辑符号，如图 1.1.8-87 a)、b)所示。由于I^2L电路的驱动电流是由PNP管的发射极注入的，所以称为集成注入逻辑门。在多集电极三极管中，每个集电极都与公共基极、公共发射极组成一个NPN三极管，由于各集电极之间被反向PN结所隔离，任何一个集电极的输出均不影响其它集电极的输出，根据其基本电路可得出其逻辑关系是：



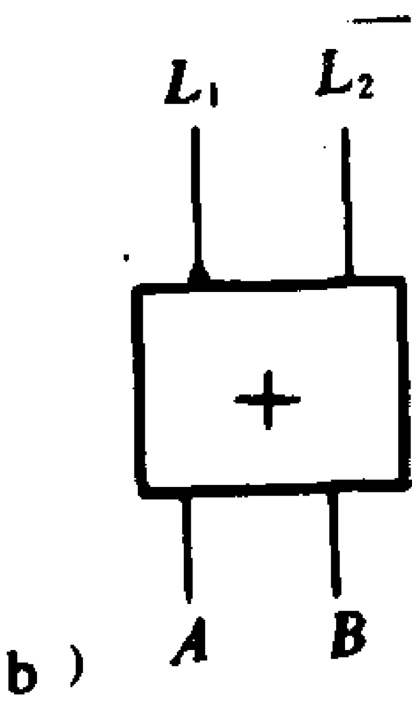


图 1.1.8-86　ECL基本门电路

任何一个集电极的输出电平与输入电平之间都是反相关系，因此I^2L电路在进行组合时，可将输出端并联使用，这就为组成各种逻辑电路带来很大方便。图 1.1.8-88 a)、b)为I^2L的输出端并联组成或非门的电路及逻辑图。

各类双极型集成逻辑门的性能、参数、列于表 1.1.8-9 中，以便对照比较。

表 1.1.8-9　　　　　　　　　　**几种双极型集成逻辑门主要性能比较**

参数＼类型	DTL	TTL	HTL	ECT	I^2L
功耗(mW)	6～8	<50	60～90	40～60	0.005～0.01
平均传输延迟时间(ns)	50～200	10～40	80～180	1～5	15～20
抗干扰能力	弱	中	强	弱	弱
负载能力(No)(扇出系数)	6～10	15 左右	15 左右	25 左右	
供电电压(V)	5	5	15	−5.2	>0.8

6.4.6　集成逻辑门使用中的几个问题

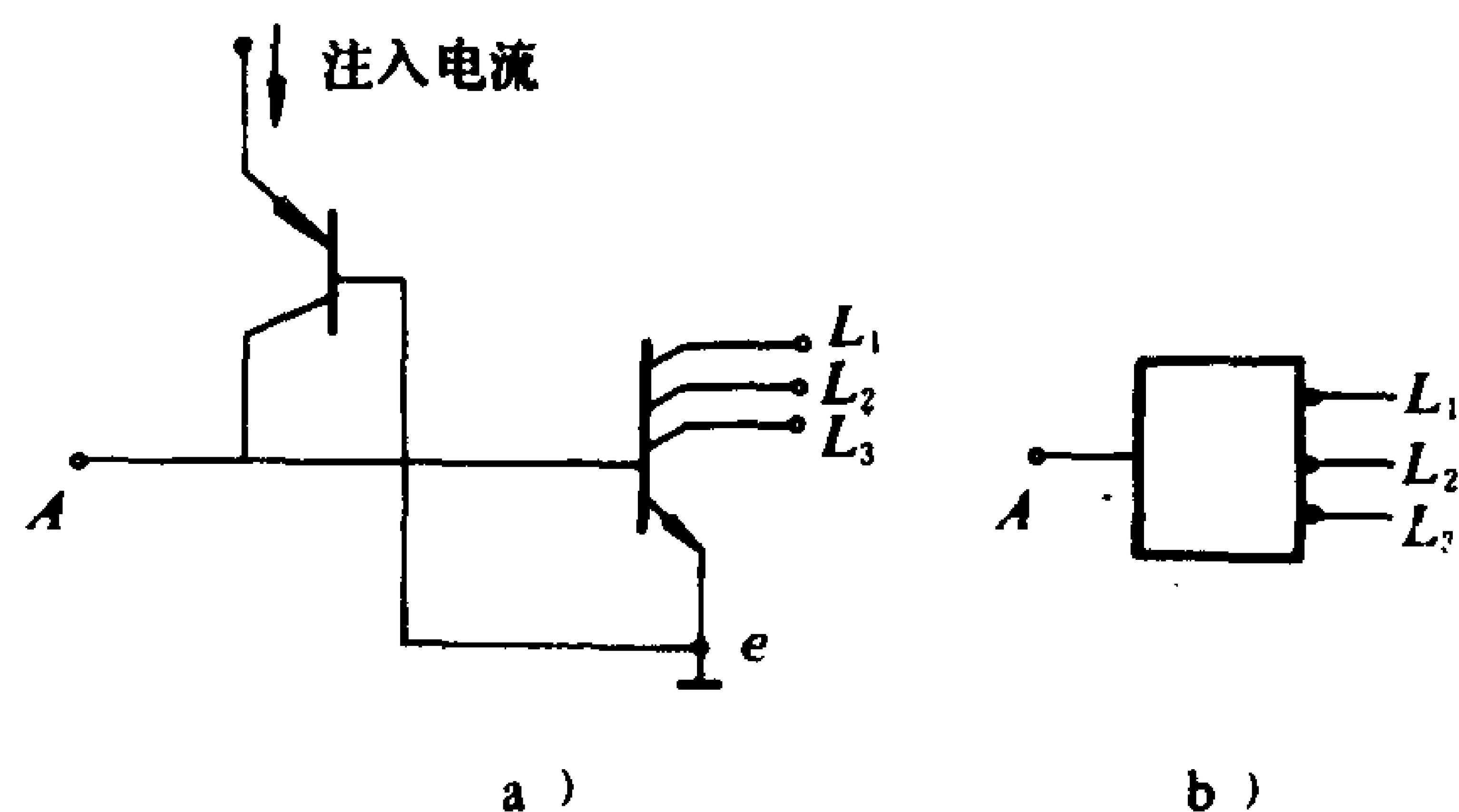


图 1.1.8-87　I^2L基本电路
a)电路原理图；b)逻辑符号

1)与非门输入端的扩展　需要增加集成“与非”门输入端时，可以将扩展器与基本“与非”门配合使用。TTL电路“与”扩展器的连接电路及其逻辑符号，如图 1.1.8-89 所示。图中基本“与非”门的b_1、c_1端是为了引入扩展器而引出的接线端子，使用时用外接线将b_1-b_1'、c_1-c_1'对应相连即可。必须注意，并不是任意一个“与非”门都可以带扩展器的，有的“与非”门元件没有带扩展器的接线端，而且各引出线的部位也不相同，所以必须弄清楚“与非”门的型号才能使用。

2)多余输入端的处理办法　集成与非门在使用时，对多余的输入端一般不采用悬空的办法，以防干扰信号从悬空的输入端引入。一般可把多余输入端接高电平（接电源线上）或与其它已用的输入端并联起来，有时也采用把多余的输入端剪去的办法。

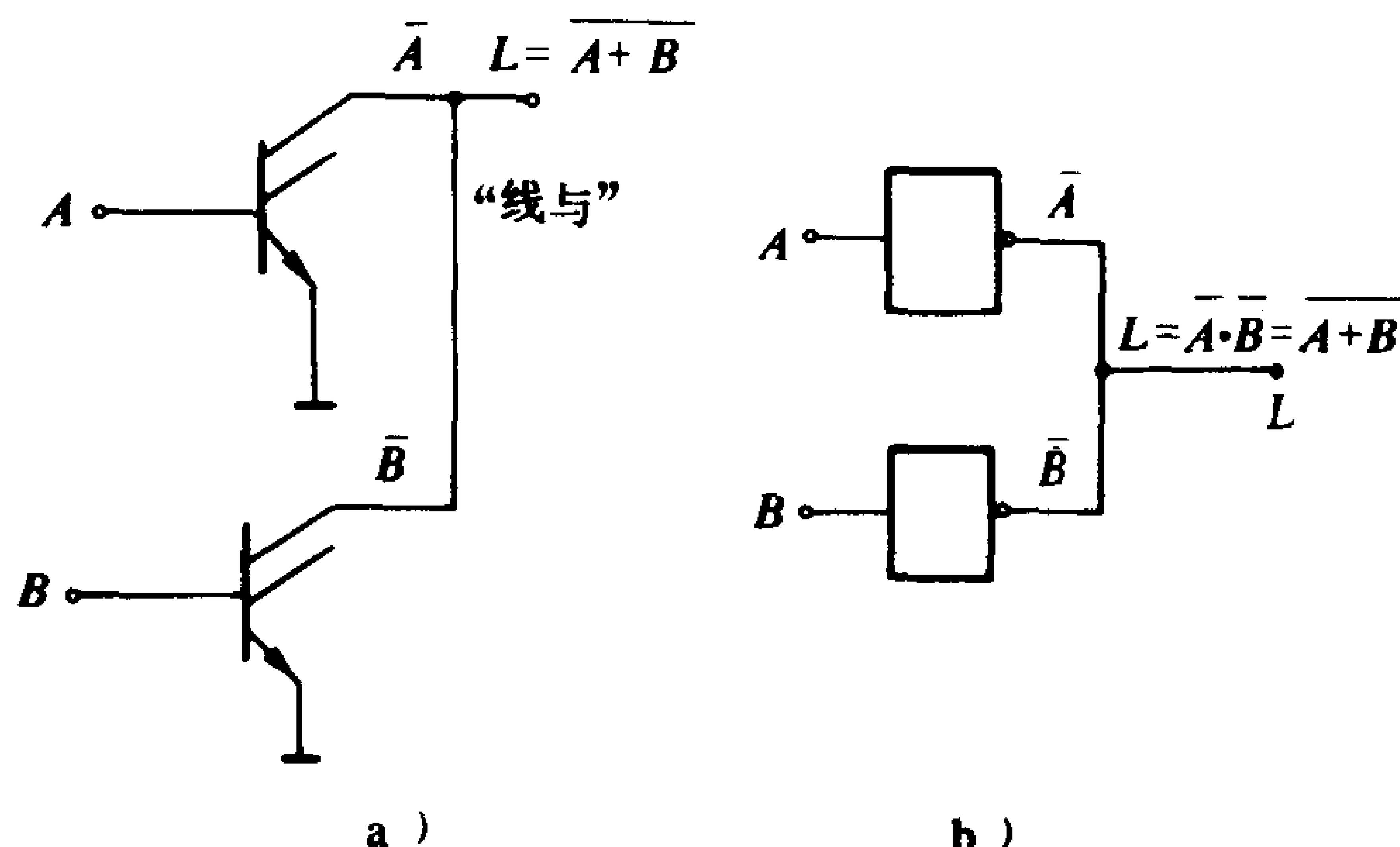


图 1.1.8-88　I^2L或非门
a)电路原理图；b)逻辑图

3)在实际使用中，有时要求用“与非”门驱动一个分立元件的三极管开关电路，如果三级管的集电极负载要求较大的电流（比如接一继电器J)，其连接电路如图 1.1.8-90 所示，由于三极管的集电极电流I_c较大，就使其基极电流I_b也相应增大，为了使“与非”门能够提供较大的负载电流，可接入由R_1、D_1、D_2组成的变换电路。如图 1.1.8-91 所示，这样可以避免因电流过大而引起输出电平的下降。

4)不同类型门电路相接　由于各种集成“与非”门的高低电平和负载能力都有所不同，

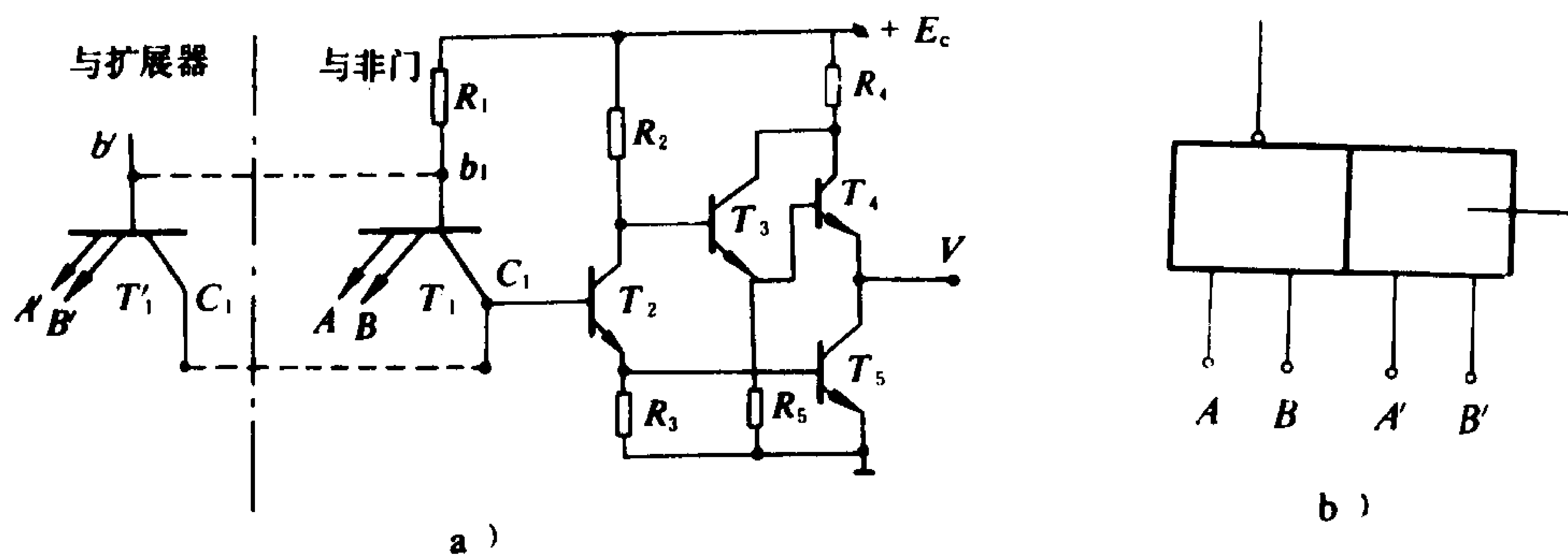


图 1.1.8-89 与非门和与扩展器的连接

a）电路原理图；b）逻辑符号

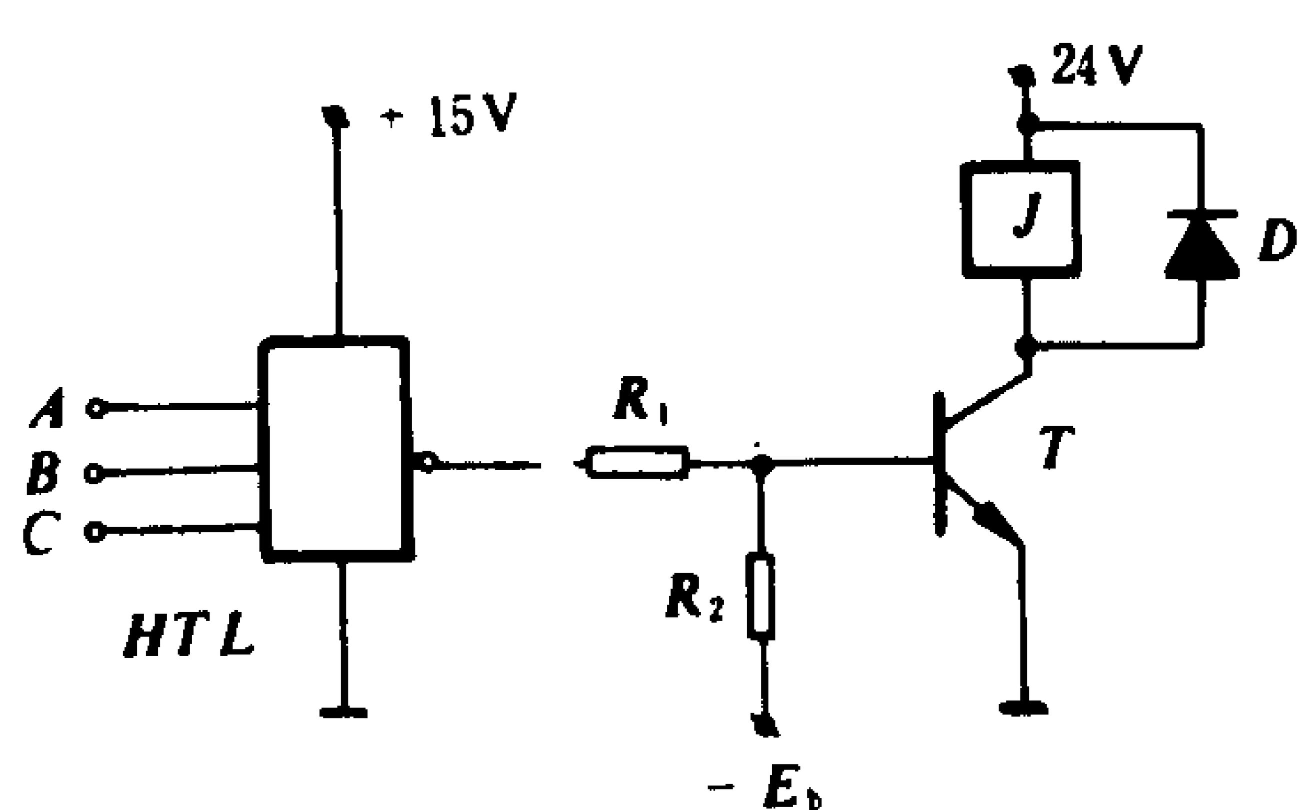


图 1.1.8-90 与非门接分立元件开关放大器电路图

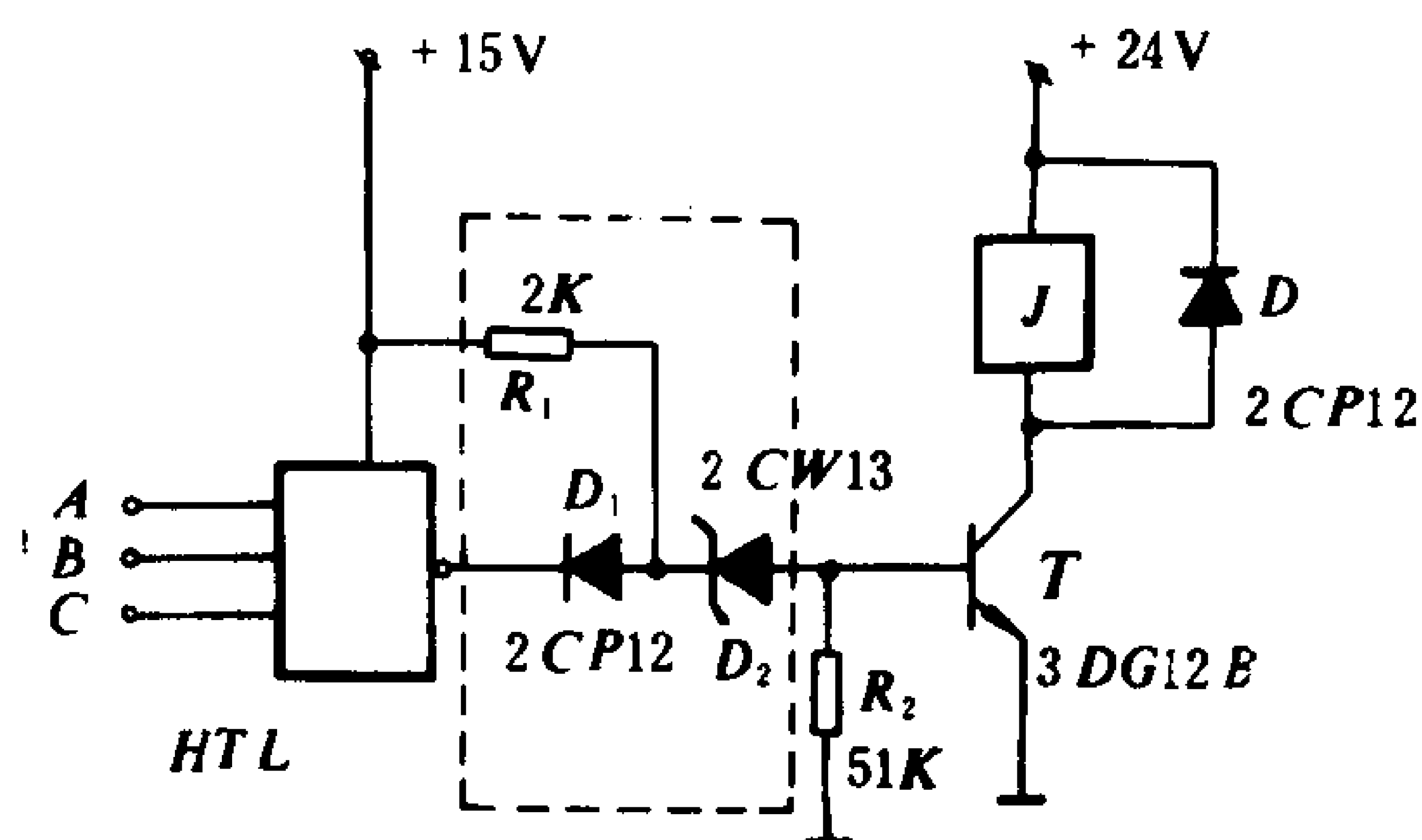


图 1.1.8-91 与非门接分立元件开关放大器的改进电路

不同类型的电路在同一系统中使用时会产生电平匹配及负载能力的问题。因此，在不同类型电路连接时，要加入转换电平的接口电路才能使用。图 1.1.8-92 表示TTL与HTL相连的电平转换电路。

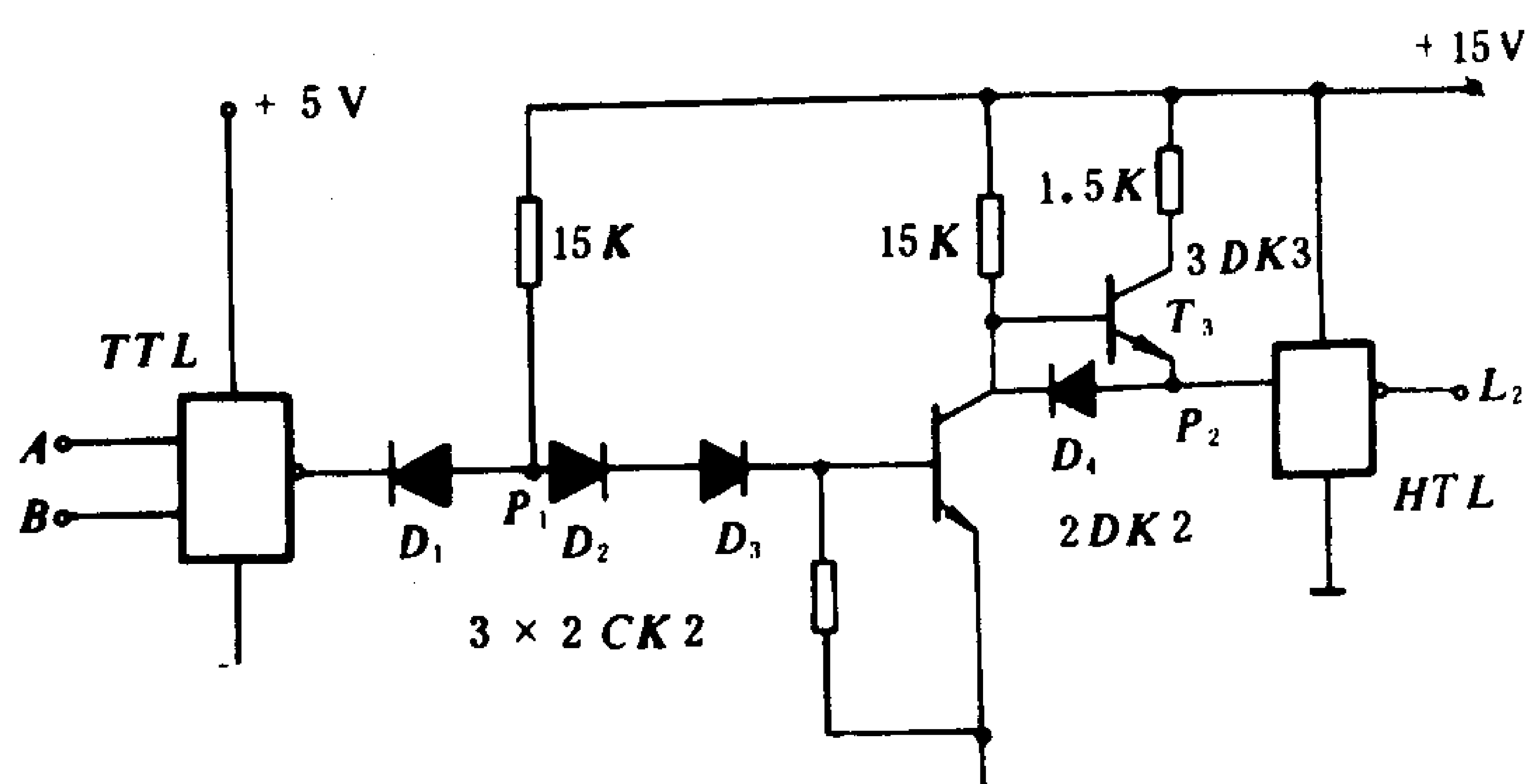


图 1.1.8-92 TTL与HTL相连的电平转换电路

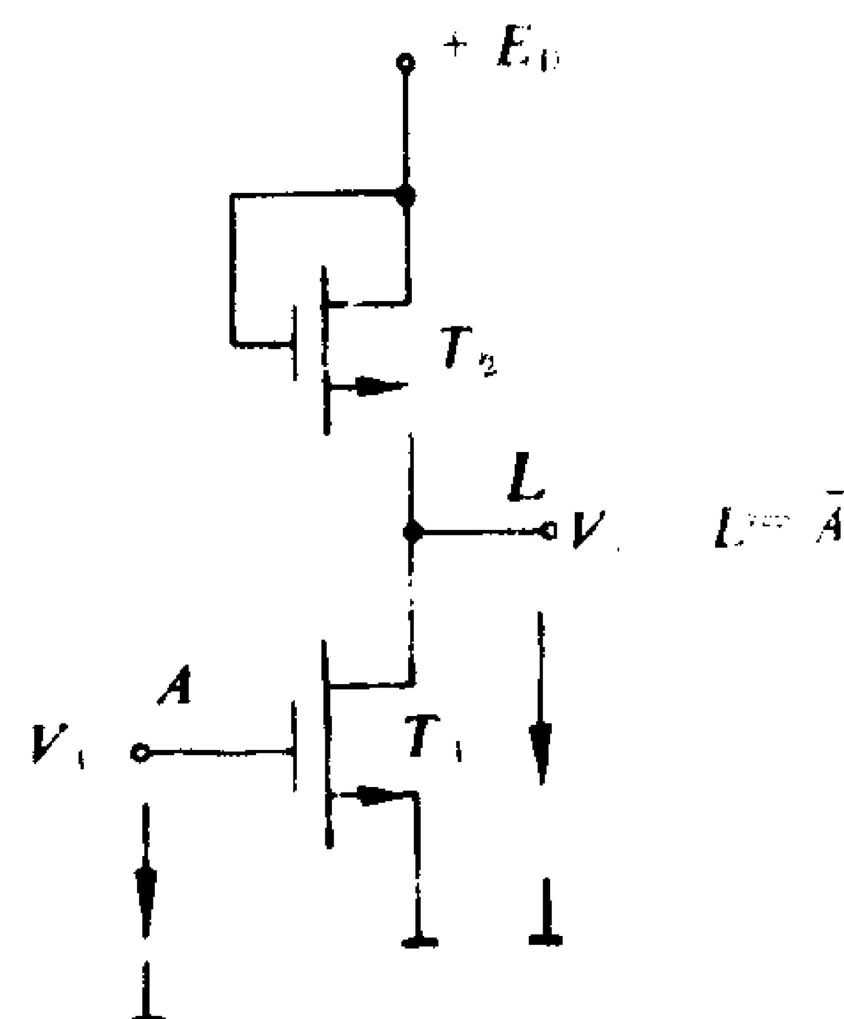


图 1.1.8-93 NMOS反相器

6.5 MOS集成门电路

MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)为金属—氧化物—半导体场效应管的简称。MOS集成门电路是由单极型的MOS管组成，由于它的结构简单、功耗小，所以在大规模集成电路的发展中占有非常突出的地位。

6.5.1 NMOS反相器

它由N沟道增强型绝缘栅场效应管构成，其基本电路如图1.1.8-93所示。T_1管为工作管，T_2为负载管。当输入信号V_i为高电平时（$E_D=10$ V，高电平值约为≥ 6.5 V），T_1和T_2管都导通，输出端V_o为低电平(≤ 1 V)；而V_i为低电平时，T_1不导通(截止)，T_2导通，V_o由T_2上拉至高电平，可见输入与输出之间为“非”的逻辑关系。为了得到较为理想的电压传输特性和尽量低的输出低电平，应使T_2管的导通电阻比T_1管大很多(比如大10倍)，这在制作集成电路时，从控制管子的几何尺寸来满足上述要求。NMOS的阈电压为2 V左右。

6.5.2 NMOS逻辑门

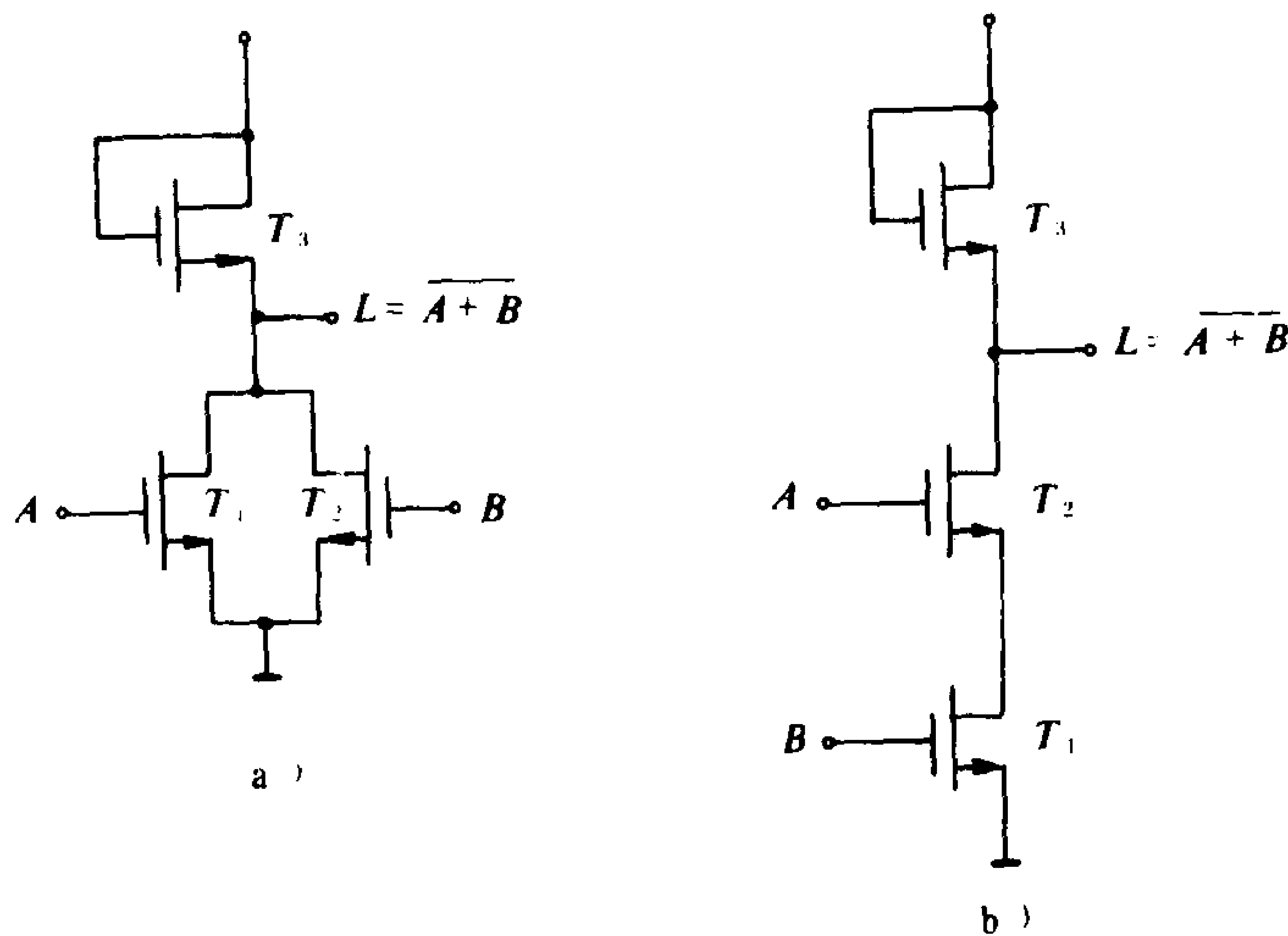


图1.1.8-94 NMOS逻辑门
a)或非门；b)与非门

NMOS“或非”门、NMOS“与非”门分别如图1.1.8-94 a)、b)所示，为了得到尽量低的低电平，工作管的导通电阻应做得更小些。“或非”门的工作管都是并联的，增加管子的个数不会使输出低电平值提高，所以，应用“或非”门比较方便，MOS门电路是以“或非”门为基础的。NMOS“与或非”门如图1.1.8-95所示。在“与非”门输出端并联上MOS管，就可以组成“与或非”门。MOS“与非”门、“或非”门都可以并联连接，这使MOS门在实用上比较灵活方便，当把几个门电路并联连接时，可以增加供给下一级的驱动电流，同时可以提高它的工作速度，但由于负载电阻减小，会使其传输特性变差。

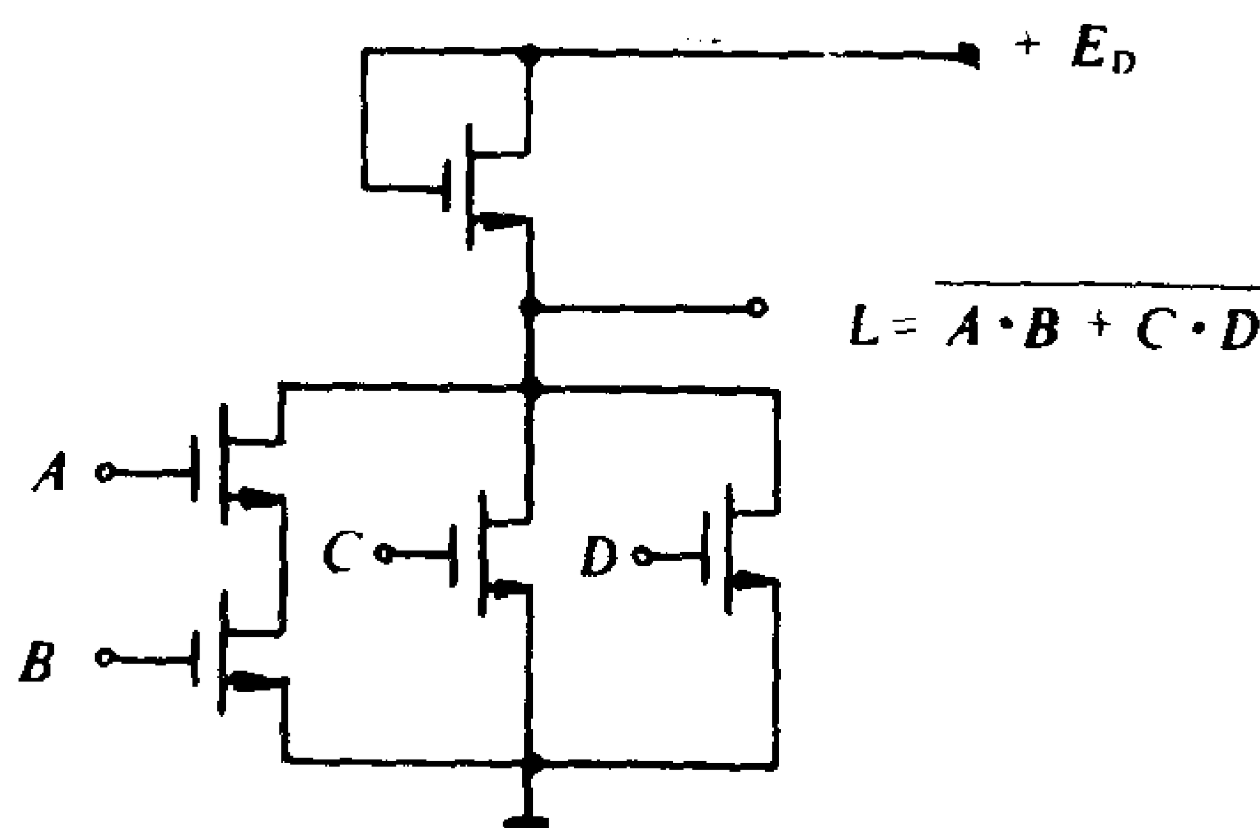


图1.1.8-95 NMOS“与或非”门电路

6.5.3 PMOS逻辑门

它是由P沟道增强型绝缘栅场效应管构成，其电路结构形式与NMOS电路完全一样，只是漏极电源的极性及源极箭头方向不同，前者接电源正极，后者接电源负极，前者源极箭头向外，后者向里。从性能上

比较，PMOS的抗干扰性能比NMOS强，但其功耗比NMOS大，工作速度比NMOS慢，PMOS的集成工艺比NMOS简单，因此它发展早，随着工艺水平的不断提高，目前NMOS电路的产品发展很快。

6.5.4 CMOS逻辑门

兼有N型和P型两种沟道的MOS电路叫做互补MOS电路，简称CMOS门电路(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor 的缩写)。这种电路的工作速度高，功耗低，所以它的产品近年来也较迅速地发展。图 1.1.8-96 a)、b)、c) 分别为CMOS反相器、CMOS"与非"门、CMOS"或非"门电路。

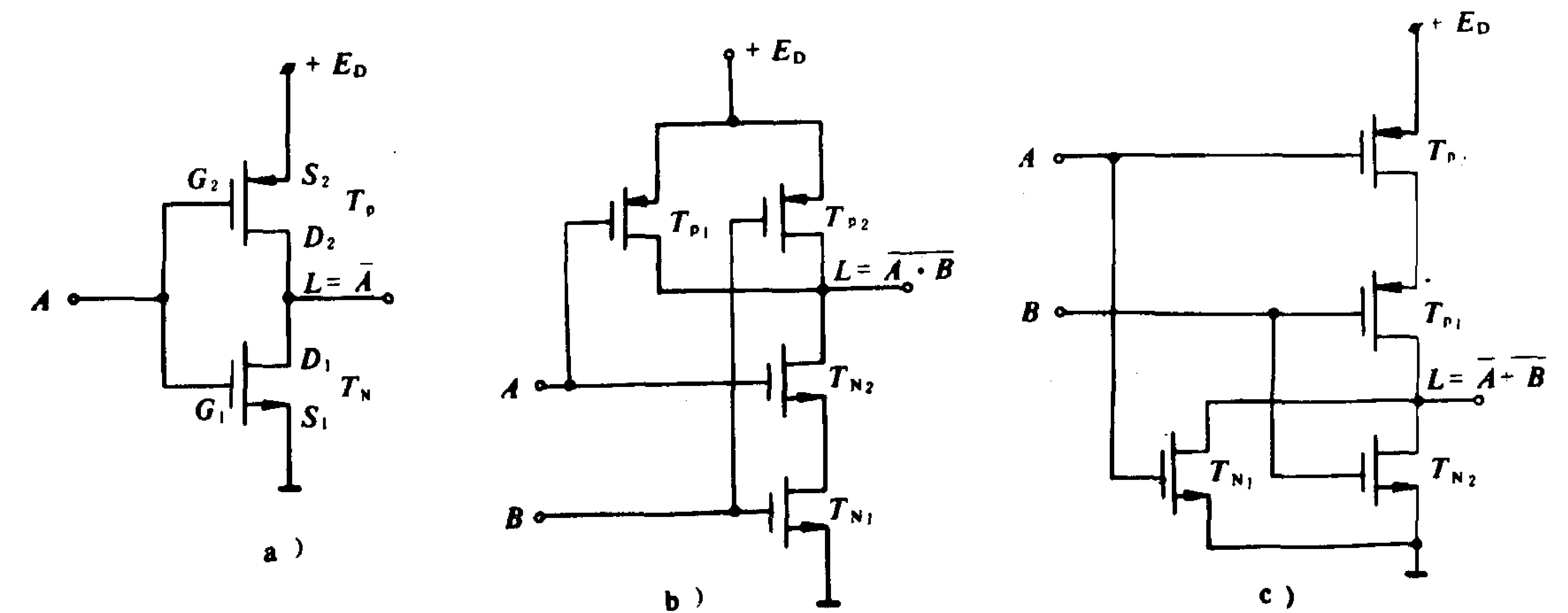


图 1.1.8-96 CMOS逻辑门电路
a)反相器；b)与非门；c)或非门

7 触发器

触发器具有"记忆"的功能，它是组成时序逻辑电路中存储部分的基本单元。

7.1 基本R-S 触发器

它是指直接复位——置位的触发器，一般由两个"与非"门或两个"或非"门交叉耦合构成，Q、$\overline{Q}$为其两个互相否定的输出端，$\overline{R}$、$\overline{S}$为其两个输入端，$Q=1$或$Q=0$为其两个稳定状态，它们的逻辑原理图，逻辑符号如图 1.1.8-97 a)、b)，图 1.1.8-98 a)、b) 所示。其逻辑功能分别列于表 1.1.8-10 及表 1.1.8-11。

表 1.1.8-10 两个与非门组成的R-S触发器真值表

$\overline{R}$	$\overline{S}$	Q
1	0	1
0	1	0
1	1	不变
0	0	不定

$Q=\overline{\overline{S}\cdot\overline{Q}}$；$\overline{Q}=\overline{Q\cdot\overline{R}}$

表 1.1.8-11 两个或非门组成的R-S触发器真值表

R	S	Q
0	1	1
1	0	0
0	0	不变
1	1	不定

$Q=\overline{R+\overline{Q}}$；$\overline{Q}=\overline{S+Q}$

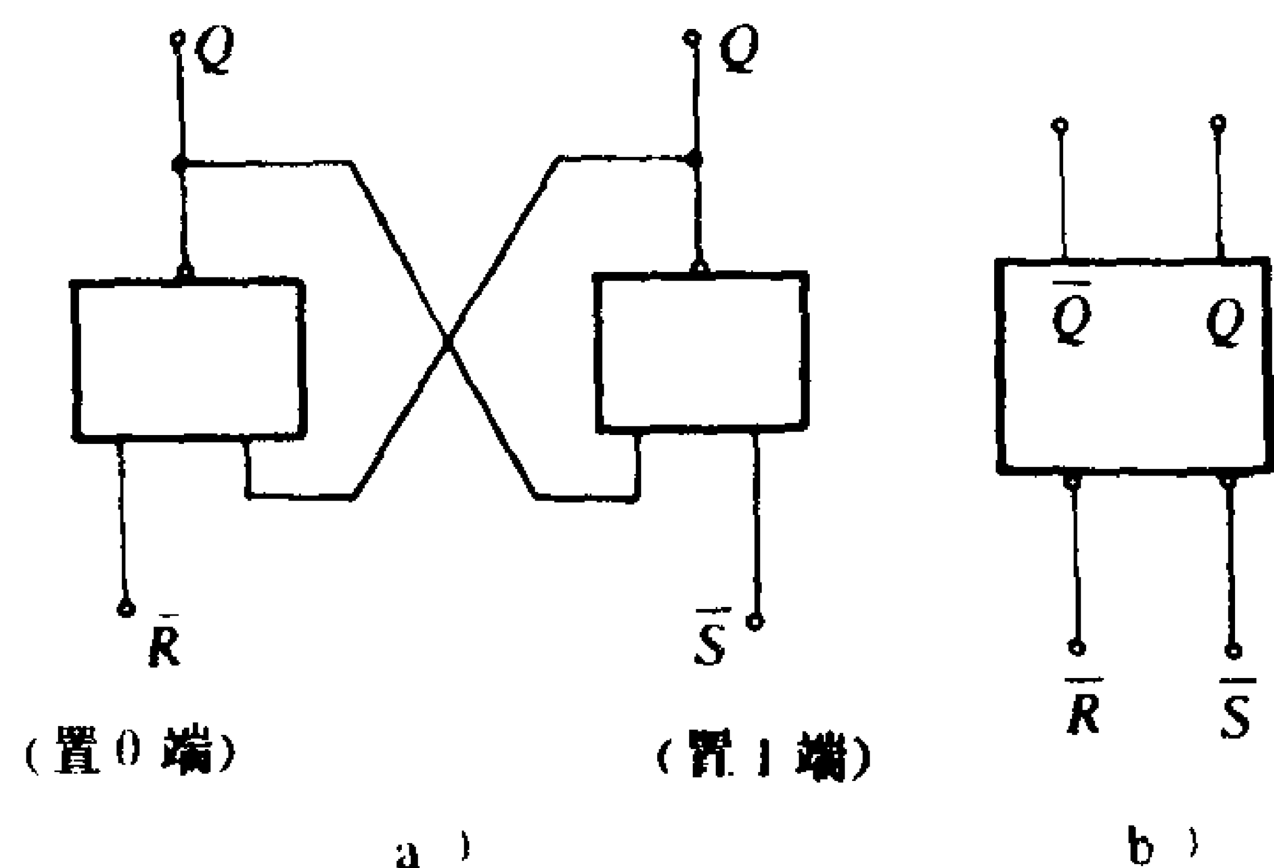


图 1.1.8-97　两个与非门组成的基本R-S触发器

a)逻辑原理图；b)逻辑符号

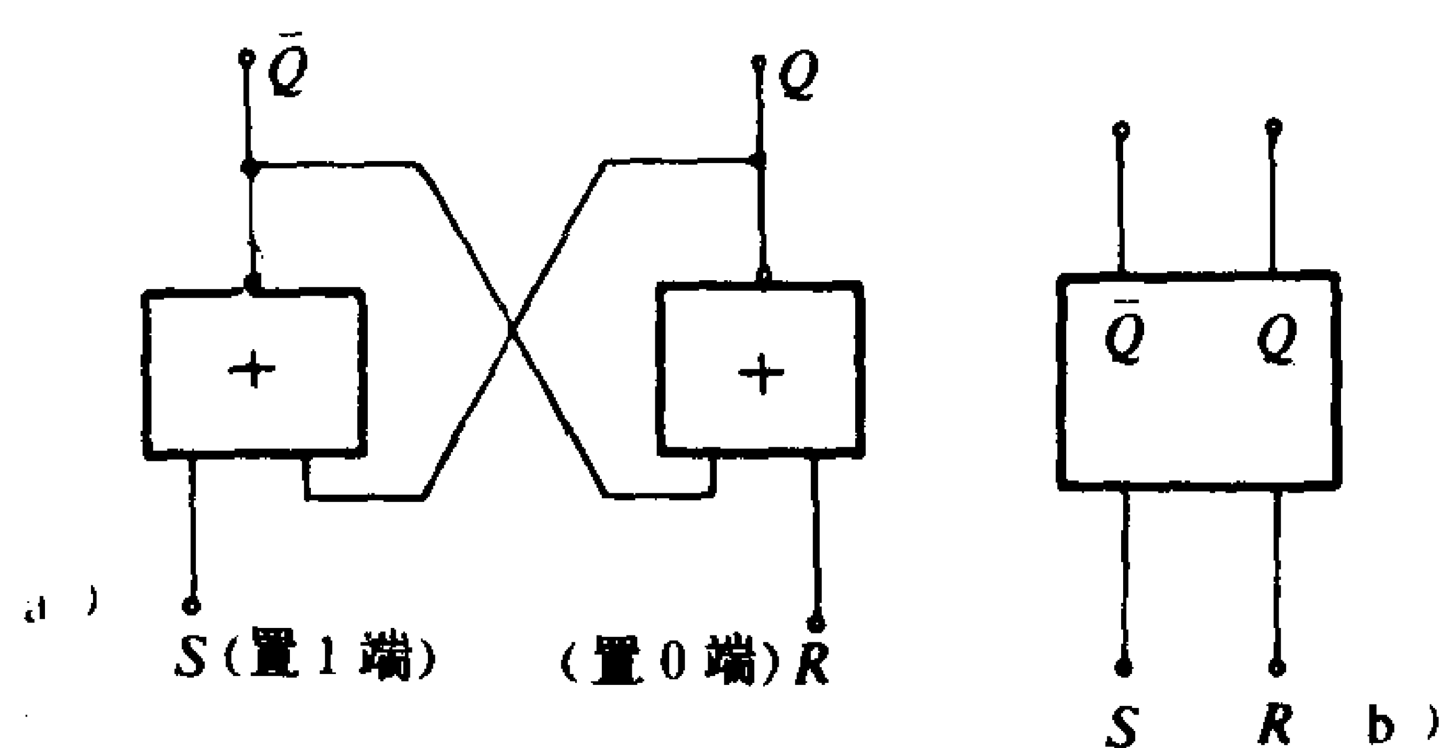


图 1.1.8-98　两个或非门组成的基本R-S触发器

a)逻辑原理图；b)逻辑符号

逻辑符号中以输入端引线上靠近框处带“0”或不带“0”来分别表明触发器是用负脉冲触发或用正脉冲触发。

基本R-S触发器具有记忆的功能，可作为二进制数码寄存器，也可作为简单的逻辑控制单元，此外，它也是各种多功能触发器的基本组成部分。

7.2　同步R-S触发器

实际应用中，往往要求触发器的状态不单纯受R、S端信号控制，还要求按一定时间节拍把R、S端的状态反映到输出端。这就要求再增加一个控制端，只有控制端出现脉冲信号时触发器才动作。至于触发器输出变化到什么状态，仍由R、S端的高低电平来决定。采用这种触发方式的触发器如图 1.1.8-99 所示，称为同步R-S触发器或可控R-S触发器。图中“与非”门G_1、G_2组成基本R-S触发器、“与非”门G_3、G_4构成控制电路，作用在控制端的信号是一个标准脉冲源，称为时钟脉冲CP（Clock Pulse 的缩写）。所谓同步就是指触发器状态的改变与时钟脉冲波形同步，这是时序逻辑电路的重要特点。

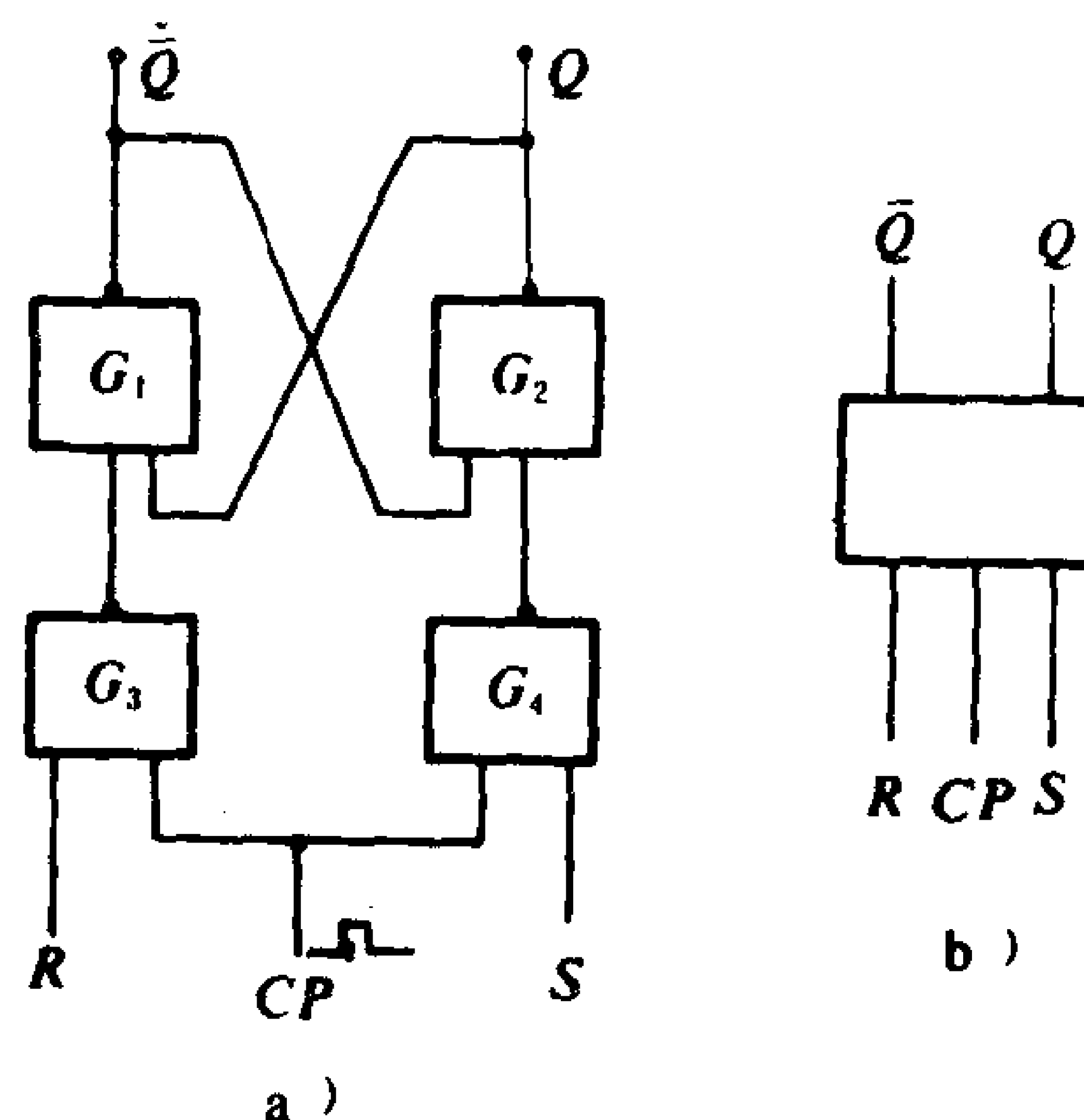


图 1.1.8-99　同步R-S触发器

a)逻辑原理图；b)逻辑符号

触发器的逻辑功能通常以特性表（逻辑功能真值表）和驱动表（激励表）表示，见表 1.1.8-12 和表 1.1.8-13，特性表是说明触发器下一个输出状态与输入信号及现在的输出状态的关系。而驱动表则是说明触发器从现在的状态变为规定的次态时，对输入信号R、S的逻辑电平的要求。

7.3　触发器的空翻现象

所谓空翻，就是指在同一个时钟脉冲持续期间内，触发器发生两次以至多次翻转。为了克服触发器的“空翻”现象，必须改进触发器的导引电路及触发方式，根据电路结构特征，

表 1.1.8-12 R-S触发器特性表

触发前状态	cp=1时输入		触发后状态
Q_n	R_n	S_n	Q_{n+1}
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	×
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	×

× 表示任意状态。

表 1.1.8-13 R-S触发器驱动表

触发前状态	触发后状态	cp=1时所需输入条件	
Q_n	Q_{n+1}	R_n	S_n
0	0	×	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	×

× 表示任意状态。

可分为主从触发器、维持阻塞触发器、边沿触发器等。

7.4 主从触发器

主从触发器由两个同步R-S触发器组成，主触发器由与非门G_5、G_6、G_7、G_8组成，从触发器由与非门G_1、G_2、G_3、G_4组成。它们的逻辑原理图和逻辑符号如图 1.1.8-100 a)和b）所示。

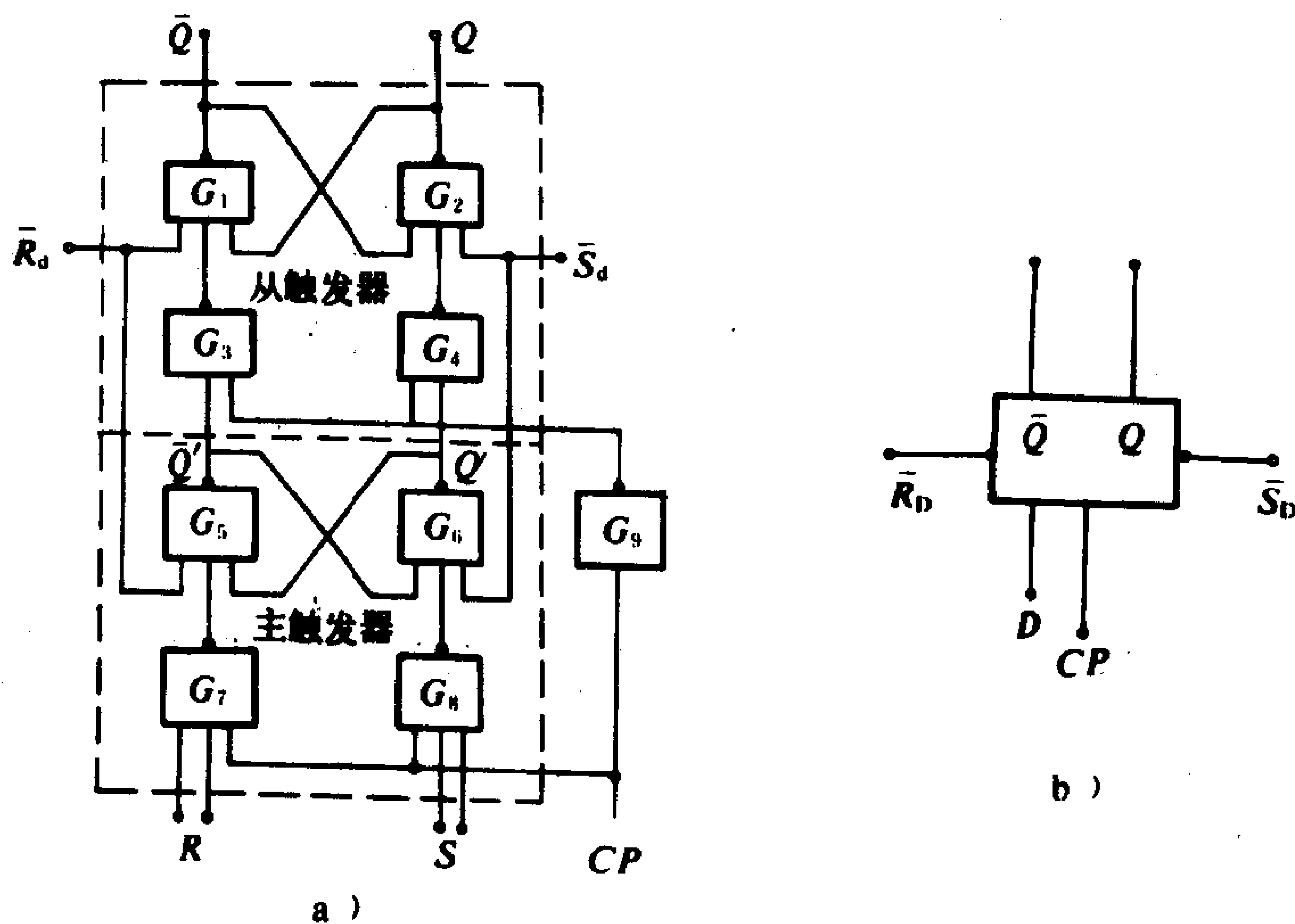


图 1.1.8-100 主从R-S触发器

a)逻辑原理图；b)逻辑符号

主从触发器是分两步工作的，第一步：$CP=1$期间输入信号存入主触发器，主从触发器的状态不变。第二步：只在时钟脉冲从“1”变“0”时，才可能控制从触发器翻转，而主触发器保持原状态不变，即不随输入信号的改变而改变，因此它能够克服“空翻”现象。需要注意的是，这种触发器输出状态的变化是发生在CP信号的下降沿，在逻辑符号中用CP输入端的小圆圈表示。

主从触发器具有比较强的逻辑功能，利用它可以很容易地组成不同逻辑功能的触发器。

7.4.1 主从J-K 触发器

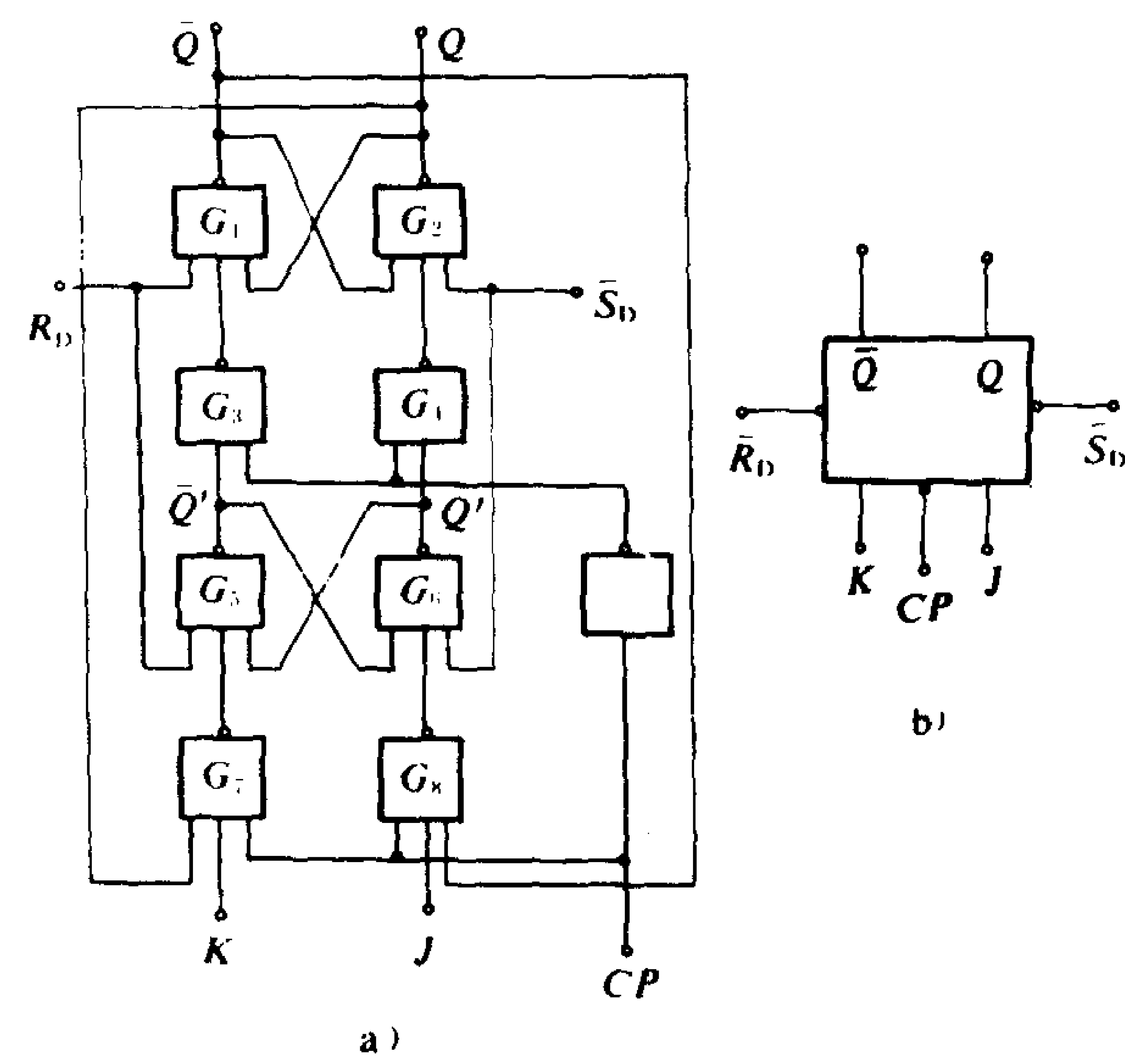


图 1.1.8-101 主从J-K触发器

a)逻辑原理图；b)逻辑符号

如果将主从触发器的输出端Q和$\overline{Q}$分别反馈到G_7、G_8的输入端，并将R端改称为K端，S端改称为J端，就成为主从J-K 触发器。其逻辑原理图及符号如图 1.1.8-101 a)、b) 所示，其特性表及驱动表见表 1.1.8-14 及表 1.1.8-15。

表 1.1.8-14 J-K触发器特性表

J	K	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

由上得出特性方程为$Q_{n+1}=J\overline{Q}_n+KQ_n$

表 1.1.8-15 J-K触发器驱动表

Q_n	Q_{n+1}	J	K
0	0	0	×
0	1	1	×
1	0	×	1
1	1	×	0

× 表示任意状态。

7.4.2 D触发器

若在主从J-K触发器的控制输入端K前加一“非”门，再与J端相连，其结点以D表示，D端即为信号输入端，这种触发器称D触发器，又称延迟触发器。其逻辑原理图及逻辑符号，如图 1.1.8-102 a)、b) 所示。表 1.1.8-16 及 1.1.8-17 分别为其特性表及驱动表。

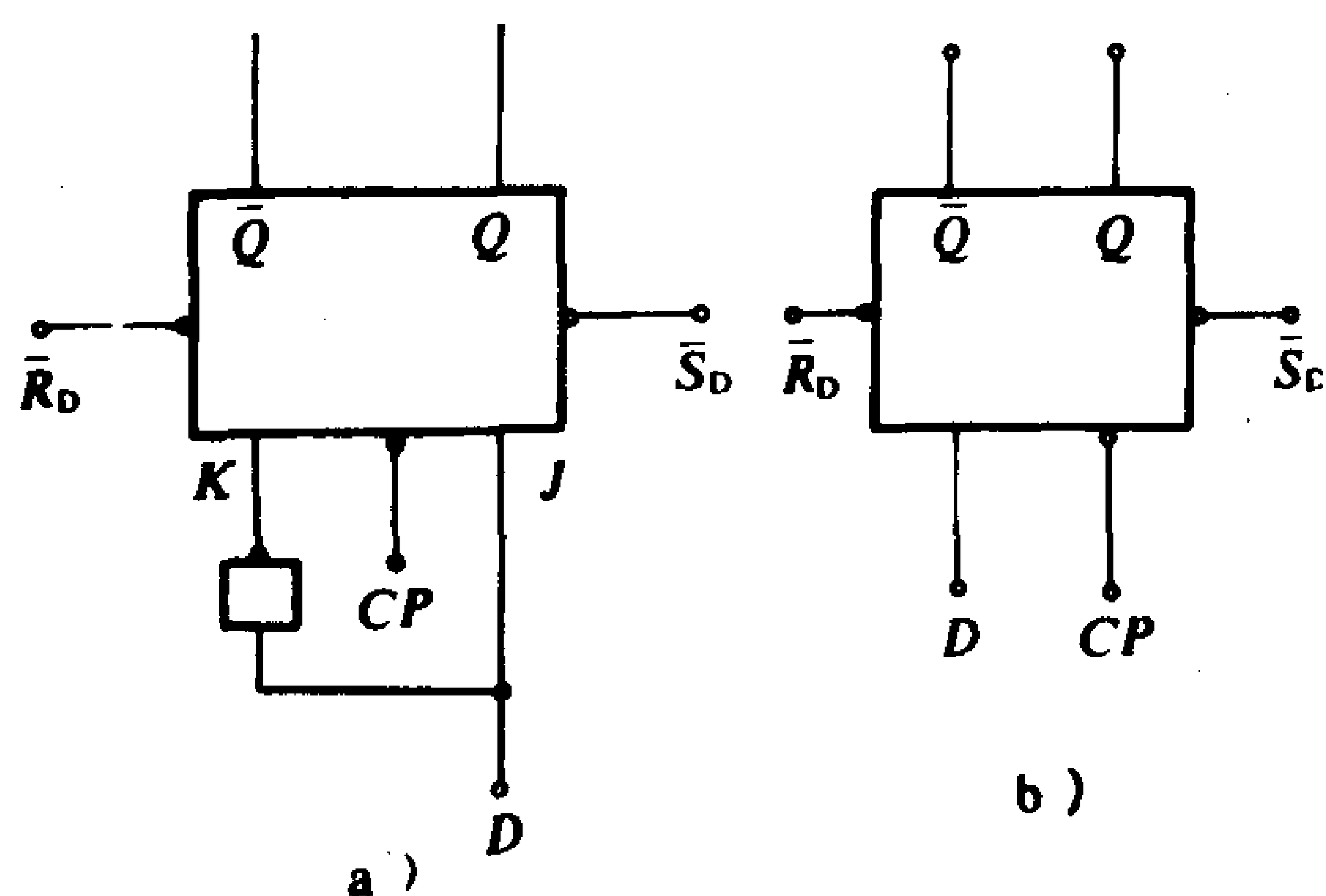


图 1.1.8-102　D触发器
a)逻辑原理图；b)逻辑符号

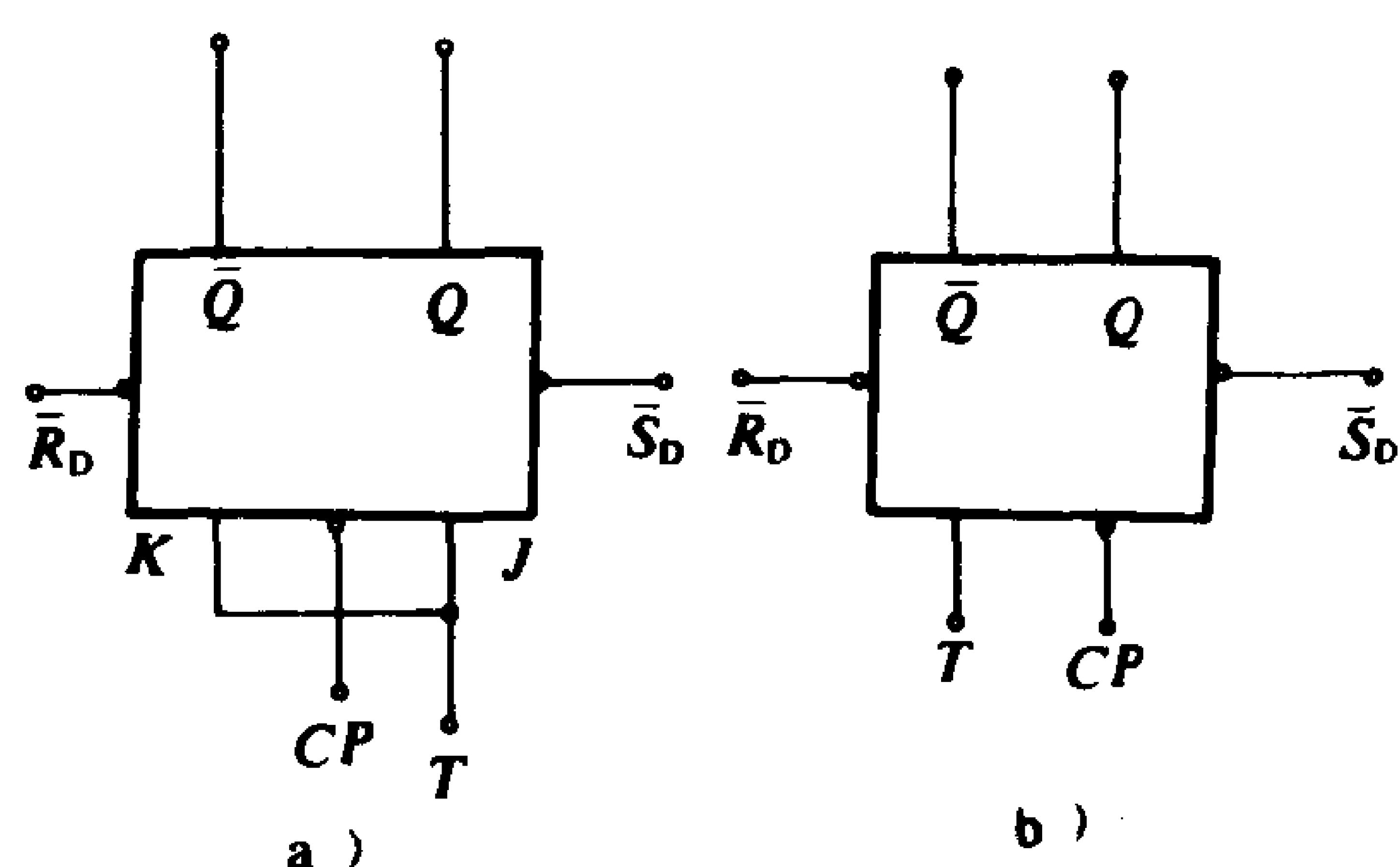


图 1.1.8-103　T触发器
a)逻辑原理图；b)逻辑符号

7.4.3　T触发器

若将J-K触发器的J、K端直接相连，共同连结端用T表示。T为信号输入端，则称为T触发器。其逻辑原理图及符号如图 1.1.8-103 a)、b)所示。表 1.1.8-18 及 1.1.8-19 分别为其特性表及驱动表。

D触发器特性表

表 1.1.8-16

D	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

特性方程：$Q_{n+1}=D$

D触发器驱动表

表 1.1.8-17

Q_n	Q_{n+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

T触发器特性表

表 1.1.8-18

T	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

特性方程：

$$Q_{n+1}=T\overline{Q}_n+\overline{T}Q_n=T\oplus Q_n$$

T触发器驱动表

表 1.1.8-19

Q_n	Q_{n+1}	T
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

7.5　维持阻塞触发器

维持阻塞触发器通常由 6 个“与非”门组成，它设置有克服空翻现象的维持—阻塞线路，故称之为维持阻塞触发器。这种触发器广泛地用来实现D触发器的功能。图 1.1.8-104 a)、b)为其逻辑原理图及逻辑符号。维持阻塞触发器是在时钟脉冲的上升沿触发，所以逻辑符号中靠近触发器方框上的CP端引线没有小圆圈。维持阻塞型D触发器的特性表及驱动表与表 1.1.8-16，1.1.8-17 相同。

从原理上来说，维持阻塞触发器除组成D触发器外，还可以组成维持阻塞型的R-S，J-K、T等功能的触发器，但实际应用很少。

从 1.1.8-104 的逻辑原理图中不难看出用$\overline{R}_D$或$\overline{S}_D$直接置“0”或置“1”时，要求$CP=0$，因此，为满足$CP=0$和$CP=1$时都能置“0”或置“1”，就要同时在G_1、G_4、G_5的输入端加置“0”负脉冲；同时在G_2、G_6的输入端加置“1”负脉冲，其逻辑原理图如图 1.1.8-105 所示。

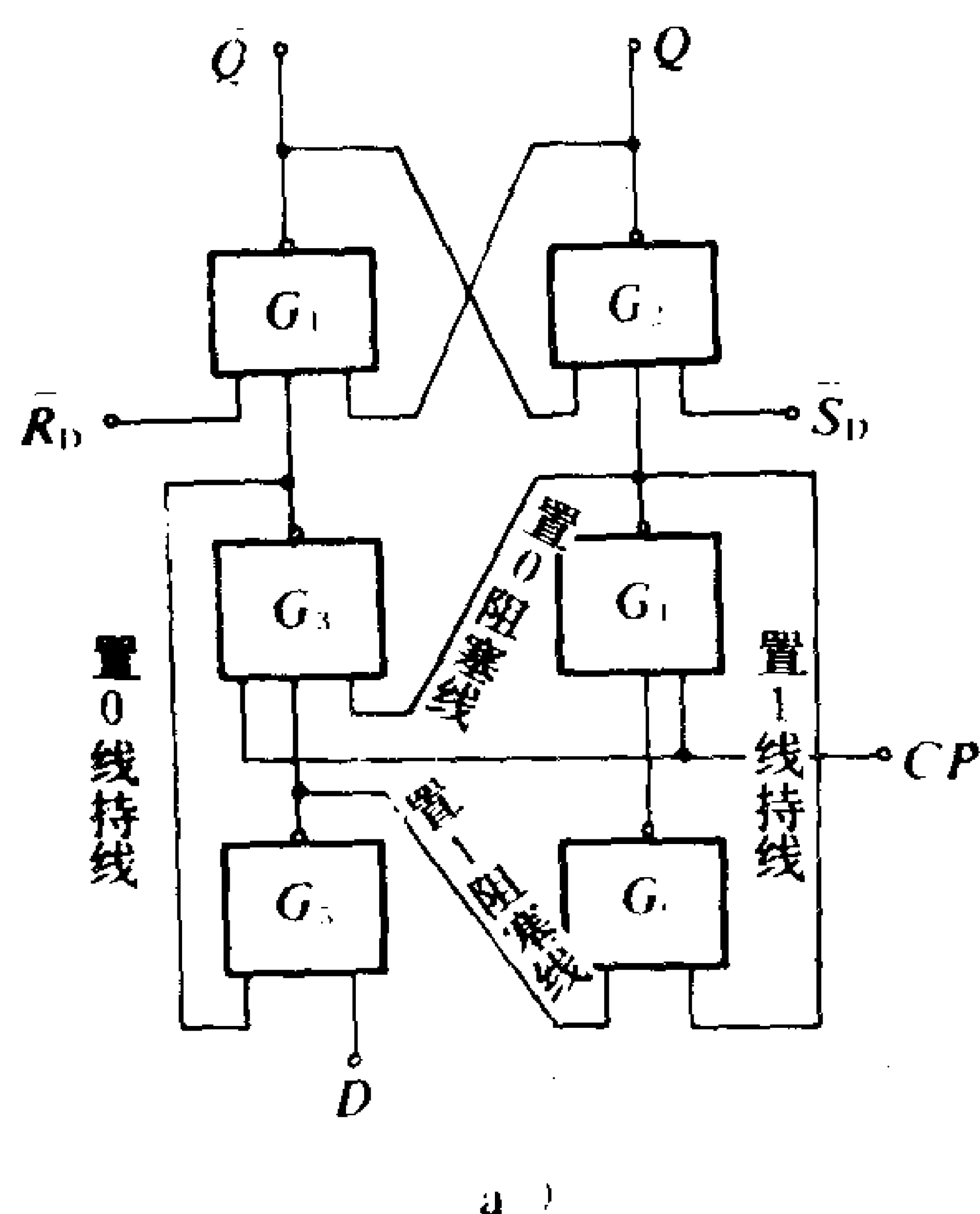


图 1.1.8-104

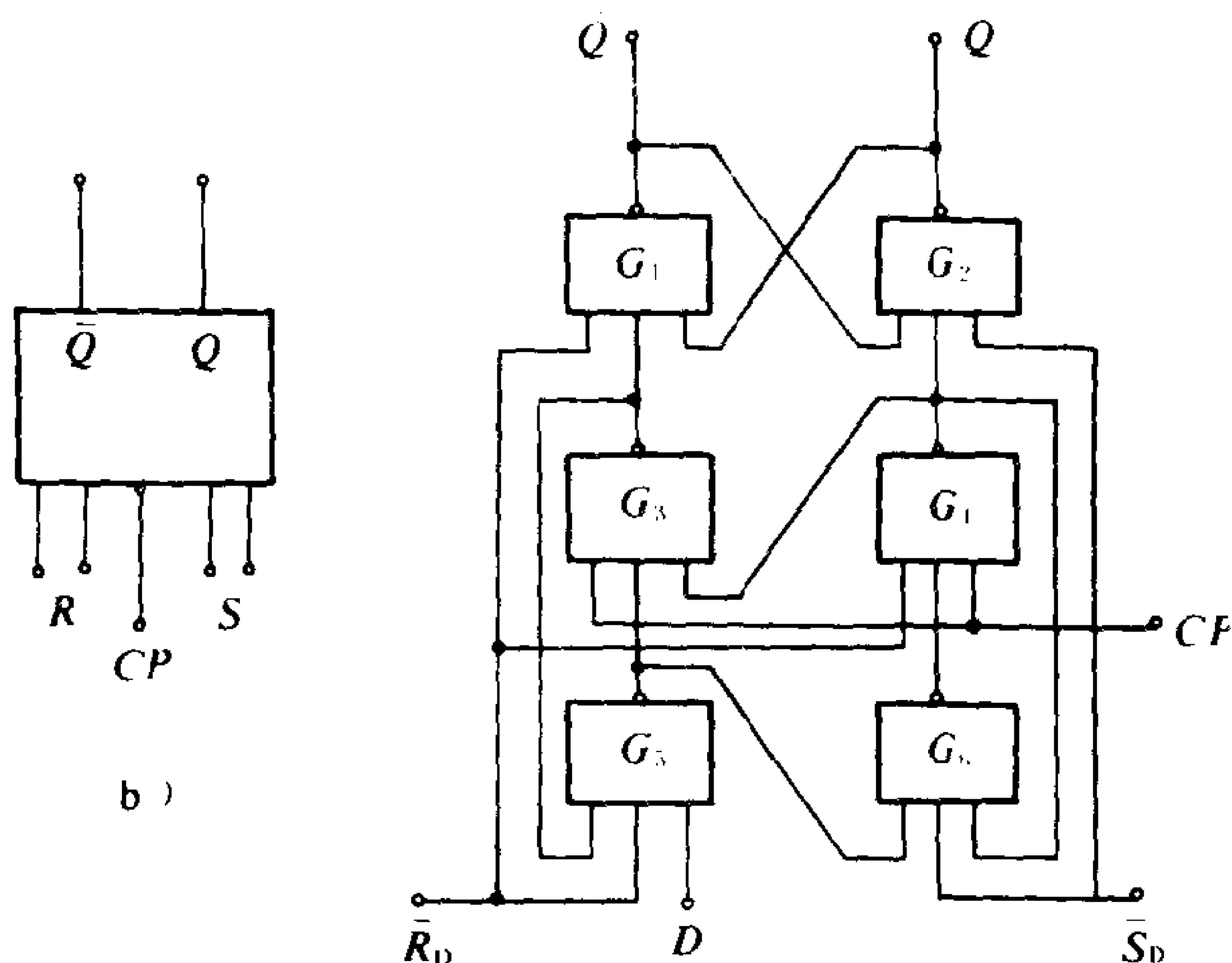


图 1.1.8-105

7.6 边沿触发器

这种触发器只是在CP脉冲的上升沿（对正边沿触发而言）或下降沿（对负边沿触发而言）时，触发器才接收控制信号并触发翻转，而在$CP=0$和$CP=1$期间，控制信号的任何变化对触发器不会产生误动作，故称边沿触发器。边沿触发器同样可以实现J-K、D触发器功能，它们的逻辑符号、特性表与上述同类触发器相同。

R-S、J-K、D、T触发器可以按照一定的方法互相转换，目前市售产品多为J-K和D触发器，表 1.1.8-20 列出了它们之间转换的方法。

表 1.1.8-20　　不同类型触发器的转换

	转换电路的逻辑表达式			
JK ⟹	D	T	RS	触发脉冲
$Q_{n+1}=J\overline{Q}_n+\overline{K}Q_n$	$J=D$ $K=\overline{D}$	$J=T$ $K=T$	$J=S$ $K=R$	脉冲后沿
	转换电路的逻辑表达式			
D ⟹	JK	T	RS	触发脉冲
$Q_{n+1}=D$	$D=J\overline{Q}_n+\overline{K}Q_n$	$D=\overline{T}Q_n+T\overline{Q}_n$ $=T\oplus Q_n$	$D=S+\overline{R}Q_n$	脉冲前沿

8 数字电路逻辑部件

8.1 寄存器

寄存器是一种重要的数字电路部件，常用来暂时存放数据、指令等。一个触发器可以存放一位二进制代码，如果存放几位二进制代码，则需要用几个触发器。

8.1.1 基本寄存器

这种寄存器只具有接收数码和清除原有数码的功能，按照接收数码方式的不同，可分成双拍和单拍两种类型。

1）双拍接收方式　接收数码过程是先清零、后放数。整个工作过程分两步进行，故称为双拍接收方式，它是由基本R-S触发器组成，图1.1.8-106为双拍接收方式四位数码寄存器逻辑原理图。

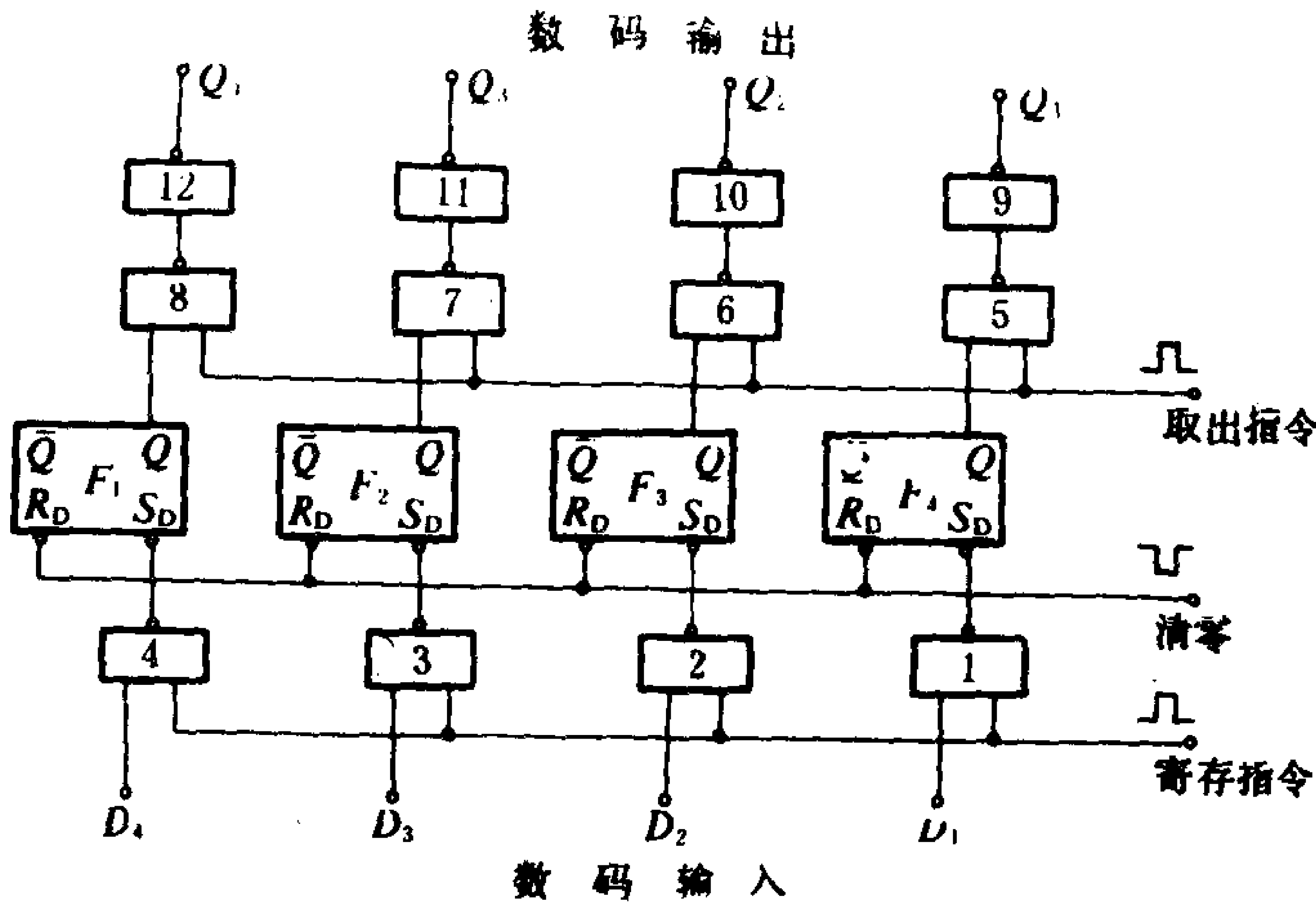


图1.1.8-106　双拍接收方式

2）单拍接收方式　由4个D锁存器组成，接收控制端就是D锁存器的时钟脉冲（CP）端，由于这种电路一步就完成了对输入数码的接收任务，所以称为单拍接收方式，其逻辑原理图如图1.1.8-107所示。

D锁存器可以由“与非”或“与或非”门组成；其逻辑原理图如图1.1.8-108及1.1.8-109所示，其特性方程、逻辑符号与D触发器相同，所以只能从型号上加以区别。见附录。

8.1.2　移位寄存器

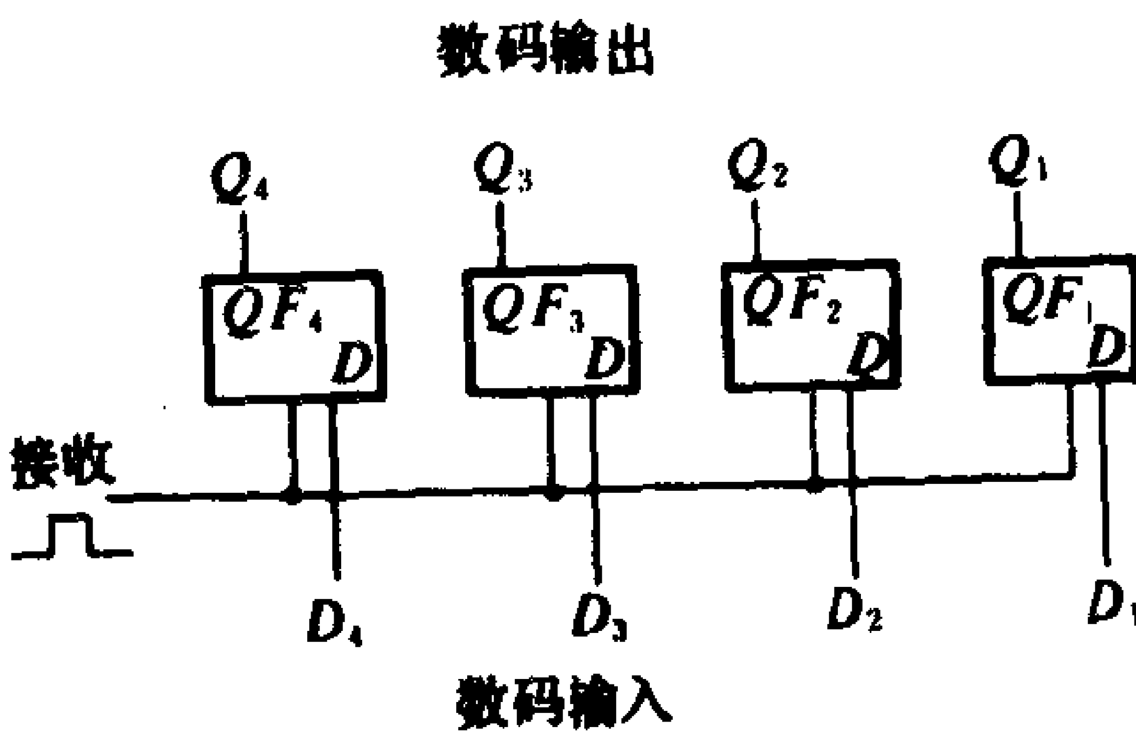


图1.1.8-107　单拍接收方式

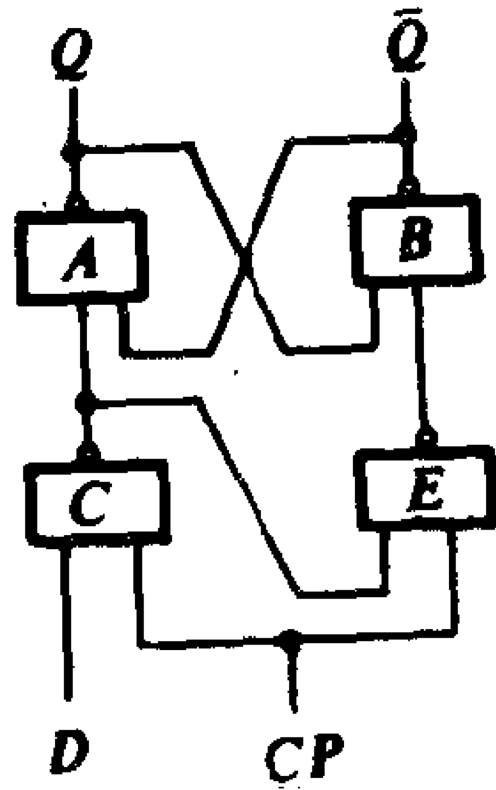


图1.1.8-108
与非门组成的D锁存器

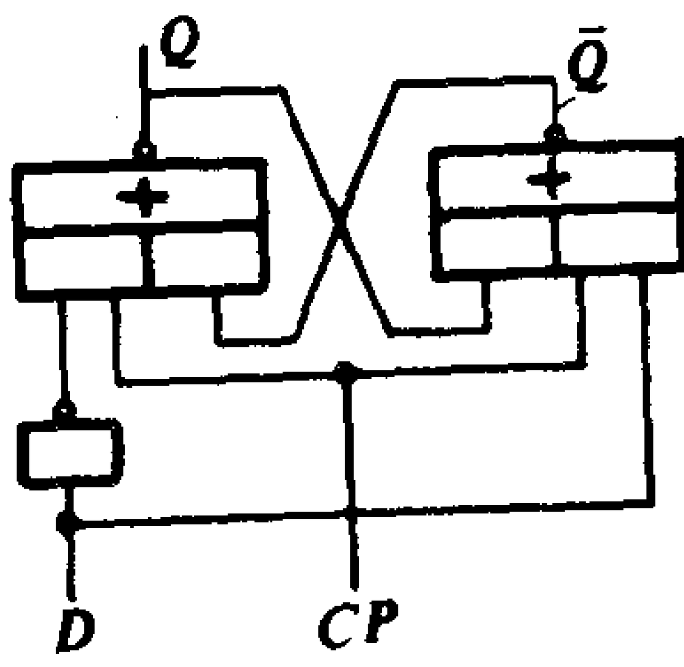


图1.1.8-109
与或非组成的D锁存器

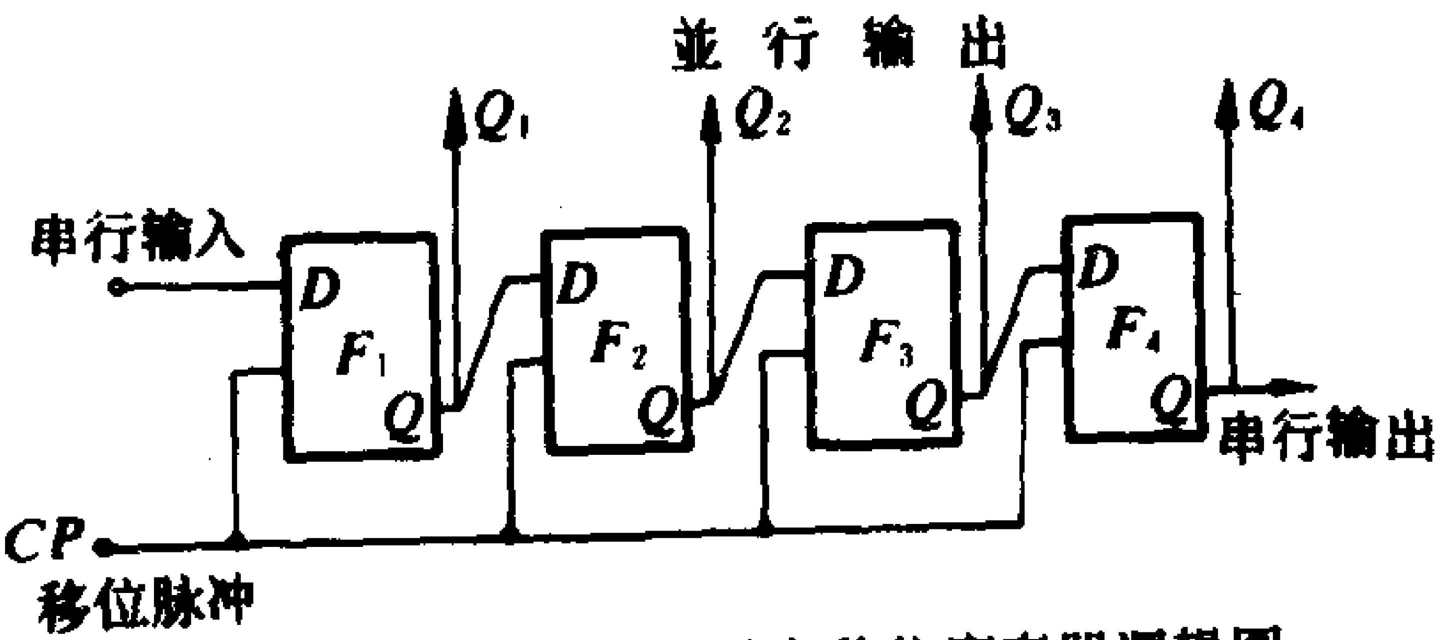


图1.1.8-110　单向移位寄存器逻辑图
（串行输入，串、并行输出）

移位寄存器除了具有存储数码的功能外，还具有移位功能。

1）单向移位寄存器　图 1.1.8-110 是用D触发器组成的单向移位寄存器，移位脉冲就是时钟脉冲，每一级触发器的D输入端接到前一级的输出端Q上，因此在移位脉冲到来后，触发器的工作状态取决于前一级触发器在移位脉冲来到前的工作状态，即把前一级触发器的工作状态移到后一级，从而实现了“移位”的逻辑功能。根据输入、输出端不同的连接可分为串行输入，串、并行输出单向移位寄存器，图 1.1.8-110 所示和串、并行输入，串行输出单向移位寄存器，当进行并行输入时，采用双拍接收方式，第一步先清零，第二步再利用接收脉冲通过S_D端输入数据。图 1.1.8-111 所示。

2）双向移位寄存器　数据既可以从F_1向F_4方向逐位移动（右移），也可以从F_4向F_1逐位移动（左移），称之为双向移位寄存器，其逻辑原理图如图 1.1.8-112 所示。

8.2　计数器

具有记忆输入脉冲个数作用的逻辑部件，称之为计数器。计数器的种类很多，按进位制可分为二进制、十进制、五进制、七进制等计数器；按计数器中触发器翻转的次序可分为异步式和同步式两种；按计数过程中数字的增、减可分为加法、减法、加减可逆计数器等。

8.2.1　二进制计数器

二进制计数器可由JK、D、T触发器组成，下面按其类别将其逻辑原理图统一列于表 1.1.8-21中以作一比较。表 1.1.8-22 及 1.1.8-23 分别为加减法计数顺序表。

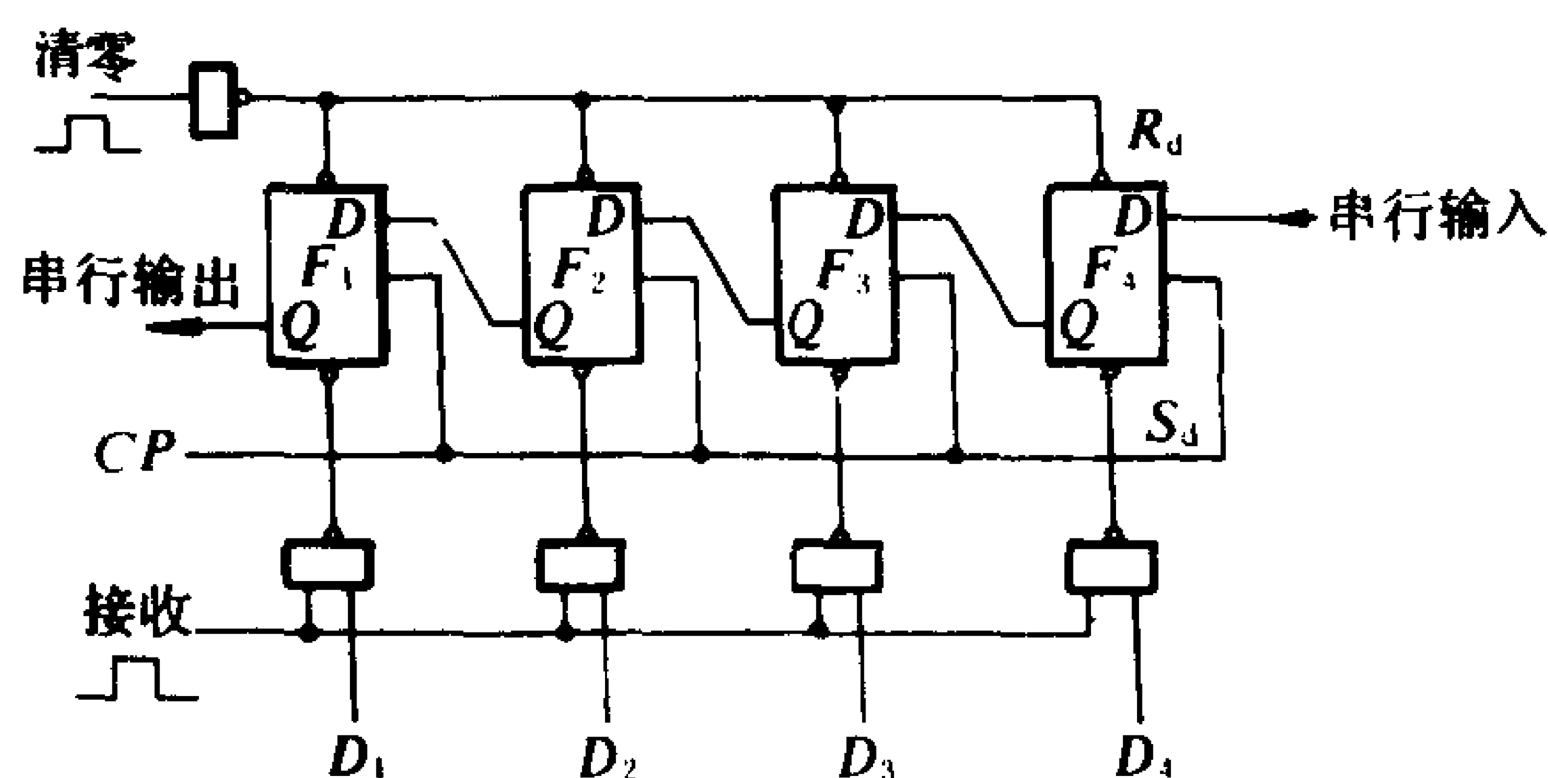


图 1.1.8-111　单向移位寄存器逻辑原理图（串并行输入、串行输出）

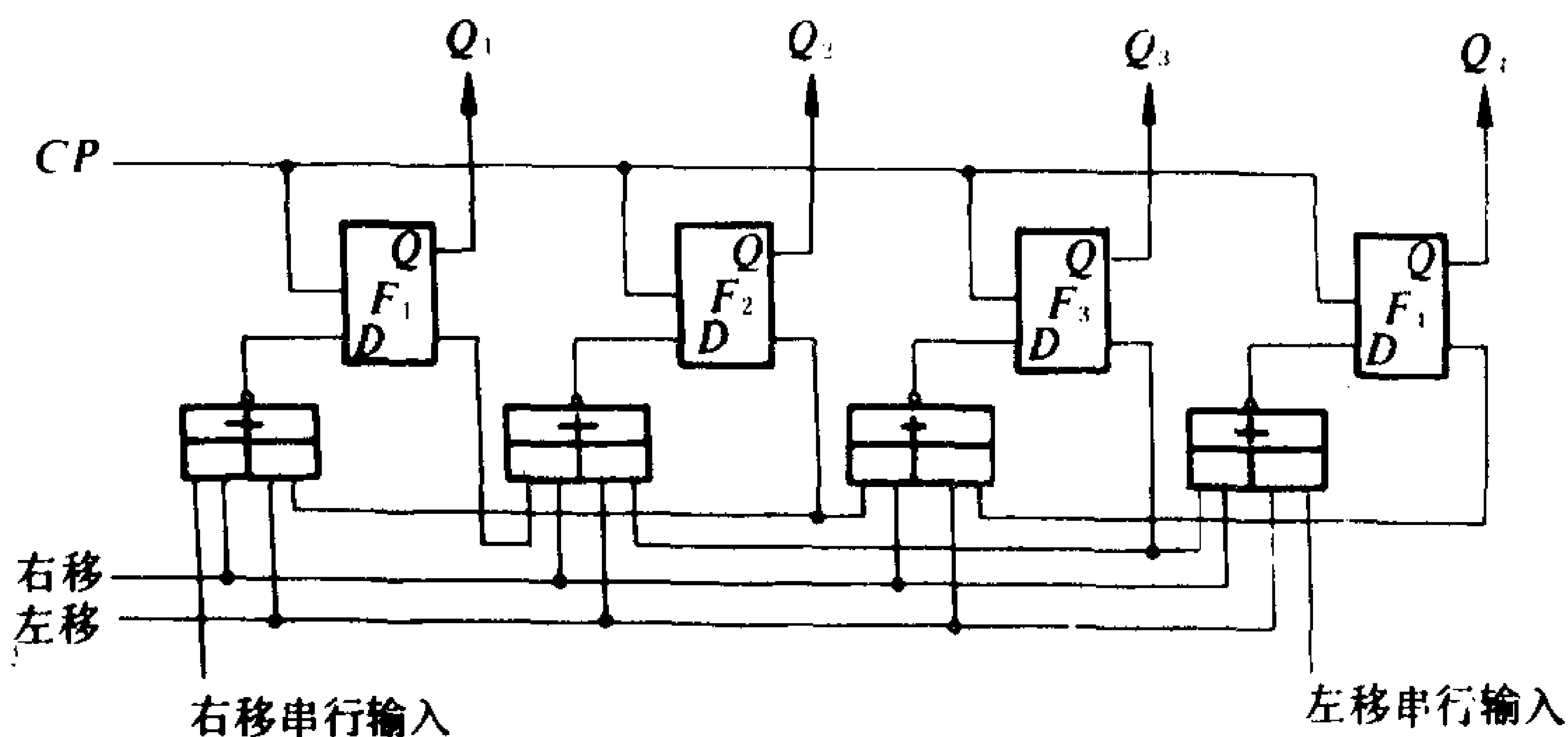


图 1.1.8-112　双向移位寄存器

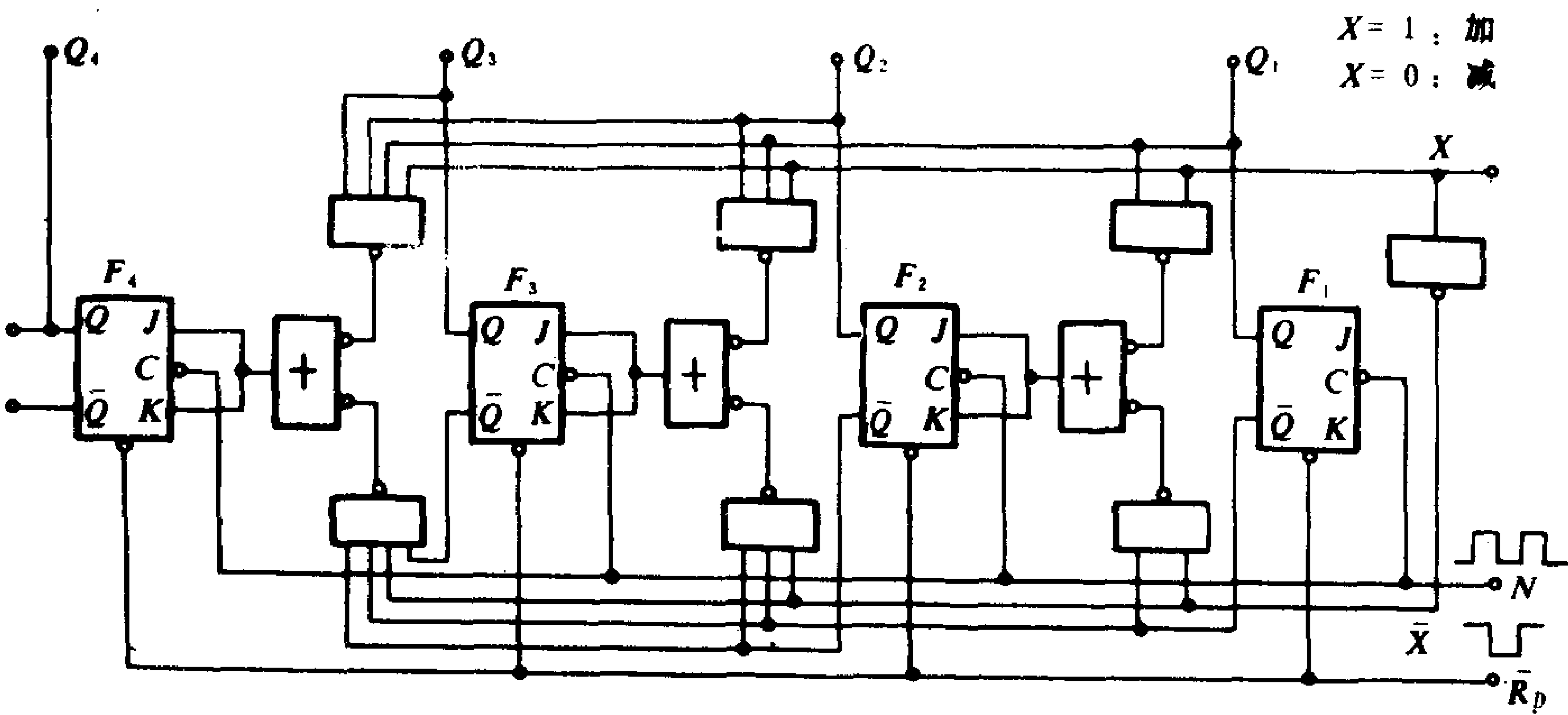
表 1.1.8-21　　　　　　　　**二进制计数器逻辑原理图**

		异步计数器			同步计数器
加法计数	JK触发器组成		JK触发器接成T型触发器	加法计数并行进位	
	D触发器组成			加法计数串行进位	
减法计数	JK触发器组成			减法计数	从二进制减法计数顺序表 1.1.8-24 中可以看出，第一级触发器每来一次计数脉冲都翻转，因此要求 $T_1=1$。计数器级间连接的规则为 $T_n=\overline{Q}_{n-1}\cdot\overline{Q}_{n-2}\cdots\cdots\overline{Q}_1$，与加法逻辑图比较，仅将 Q 换成 $\overline{Q}$ 就可将加法计数器变成减法计数器。
	D触发器组成				
归纳	①二进制计数器可由 JK、D、T 型触发器组成，n 个触发器具有 2^n 个状态，计数容量为 2^n-1。 ②同步计数器的计数速度比异步计数器高，而且由于各个触发器的状态几乎是同时改变的，在译码显示时，不易产生差错，但要求具有较大功率的脉冲源。 ③现已普遍使用集成电路，74LS163 就是四位同步计数器。				

	异步计数器	同步计数器

加减可逆计数器

并行进位同步二进制可逆计数器



双时钟输入式二进制可逆计数器

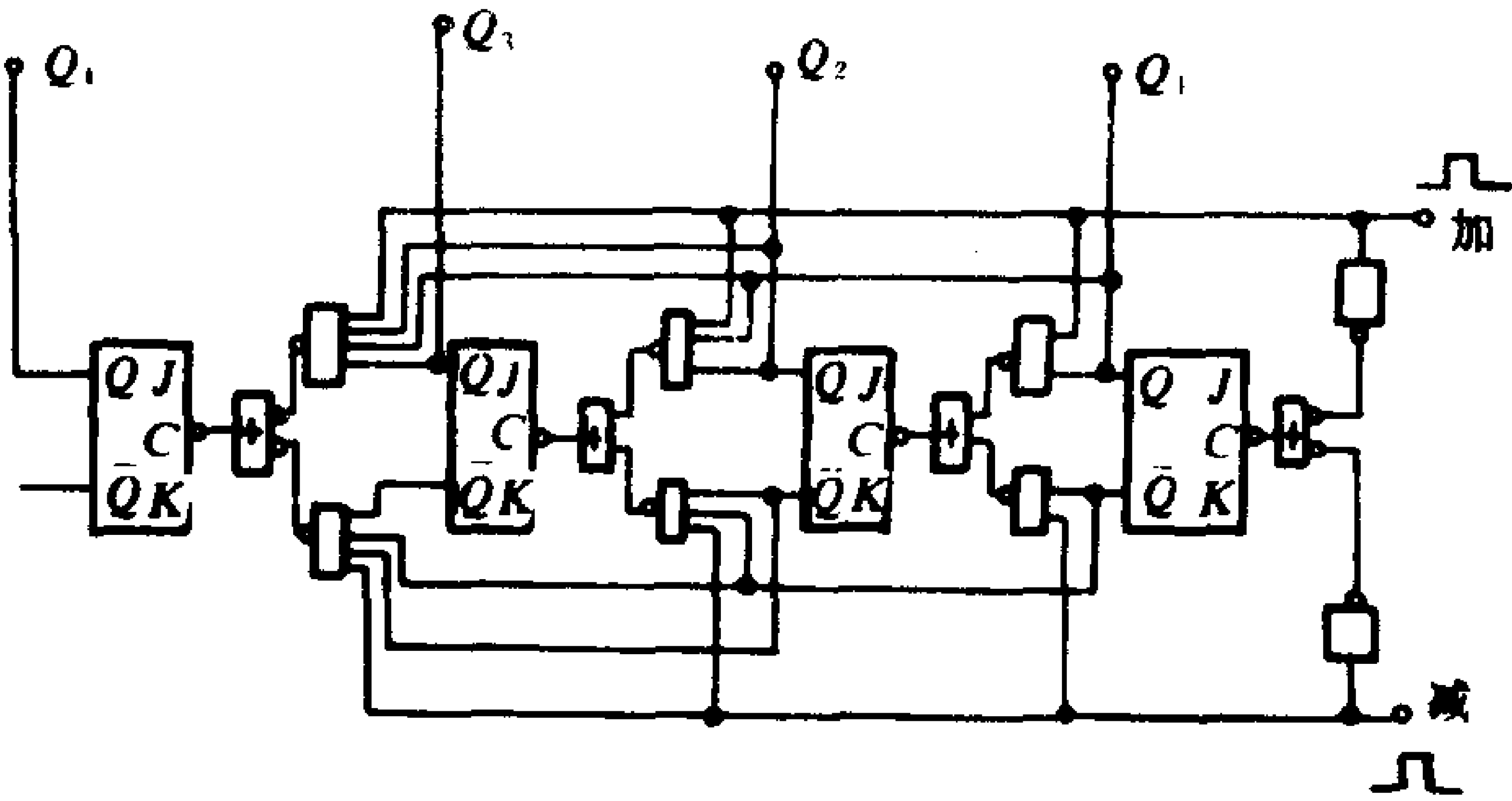


表 1.1.8-22　**二进制加法计数顺序表**

计数顺序	二进制数				十进制数
	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	0	1	1	3
4	0	1	0	0	4
5	0	1	0	1	5
6	0	1	1	0	6
7	0	1	1	1	7
8	1	0	0	0	8
9	1	0	0	1	9
10	1	0	1	0	10
11	1	0	1	1	11
12	1	1	0	0	12
13	1	1	0	1	13
14	1	1	1	0	14
15	1	1	1	1	15
进位 16	0	0	0	0	16

表 1.1.8-23　**二进制减法计数顺序表**

计数顺序	二进制数				十进制数
	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	
0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	15
2	1	1	1	0	14
3	1	1	0	1	13
4	1	1	0	0	12
5	1	0	1	1	11
6	1	0	1	0	10
7	1	0	0	1	9
8	1	0	0	0	8
9	0	1	1	1	7
10	0	1	1	0	6
11	0	1	0	1	5
12	0	1	0	0	4
13	0	0	1	1	3
14	0	0	1	0	2
15	0	0	0	1	1
16	0	0	0	0	0

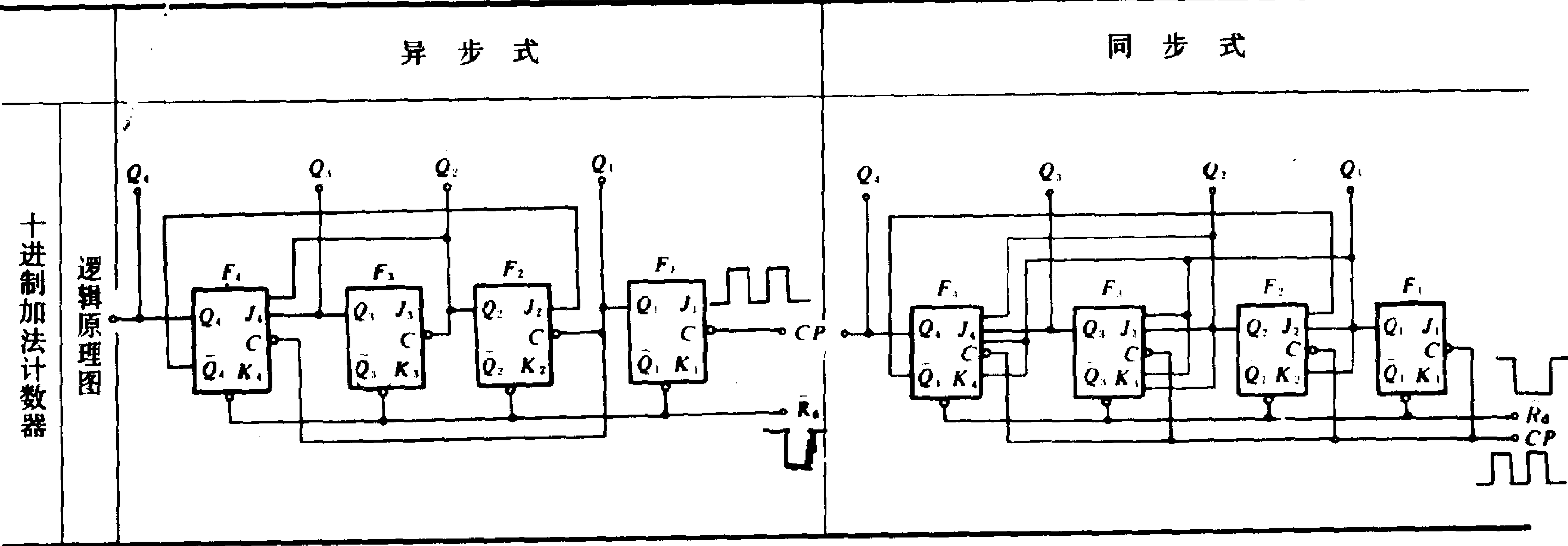
8.2.2 十进制计数器

二一十进制编码有 8421、2421、余 3 码、循环码等等，所以二一十进制计数器种类也很多，现只介绍常使用的 8421 编码的十进制计数器，这种编码只采用其中 0000，0001—1001 十个状态。1010—1111 六个状态无效。它可用四个二进制计数器加以改进即可得到。几种类型的十进制计数器列于表 1.1.8-24 中，可作比较。

8.2.3 N 进制计数器

利用触发器可以组成计数容量为任何整数的所谓任意进制的计数器，即N进制计数器。表 1.1.8-25 给出用J-K触发器组成的 3 、 5 、 7 、11 进制计数器逻辑原理图。

表 1.1.8-24　**十 进 制 计 数 器**



		异 步 式	同 步 式
十进制加法计数器	驱动方程	$J_1=K_1=1$ $J_2=\overline{Q}_4$, $K_2=1$ $CP_2=Q_1$ $J_3=K_3=1$ $CP_3=Q_2$ $J_4=Q_2\cdot Q_1$, $K_4=1$ $CP_4=Q_3$	$J_1=K_1=1$ $J_2=Q_1\cdot\overline{Q}_2$, $K_2=Q_1$ $J_3=K_3=Q_1\cdot Q_2$ $J_4=Q_1\cdot Q_2\cdot Q_3$, $K_4=Q_1$
十进制减法计数器	逻辑原理图		
	驱动方程	$J_1=K_1=1$ $J_2=\overline{\overline{Q}_3\cdot\overline{Q}_4}$, $K_2=1$ $CP_2=\overline{Q}_1$ $J_3=K_3=1$ $CP_3=\overline{Q}_2$ $J_4=\overline{Q_2\cdot\overline{Q}_3}$, $K_4=1$ $CP_4=\overline{Q_1}$	$J_1=K_1=1$ $J_2=\overline{Q_1}\cdot\overline{Q_3\cdot Q_4}$, $K_2=\overline{Q_1}$ $J_3=\overline{Q}\cdot Q_4$, $K_3=\overline{Q}_1\cdot\overline{Q}_2$ $J_4=\overline{Q}_1\cdot\overline{Q}_2\cdot\overline{Q}_3$, $K_4=\overline{Q}_1$
同步十进制可逆计数器逻辑原理图		同步 可逆计数器	

注：在上述的逻辑图中，若JK触发器的J，K端数不够用时，则可利用与门来扩展。

表 1.1.8-25　　　　　　　　　　N 进 制 计 数 器

	同 步 式	异 步 式
三进制		
五进制		
七进制		
十一进制		

8.3 译码器和数码显示器

在数字测量仪表和各种数字系统中，都需要将数字量直观地显示出来，因此，数字显示电路是许多数字设备必不可少的组成部分。在数字电路中，数字量都是以一定的代码（如某种编码）形式出现的，所以，数字显示电路通常由译码器、驱动器和显示器等部分组成。

8.3.1 辉光数码管译码显示电路。

1）辉光数码管　图 1.1.8-113 是 SZ-1 型辉光数码管的外形和管脚、符号图。它有一个

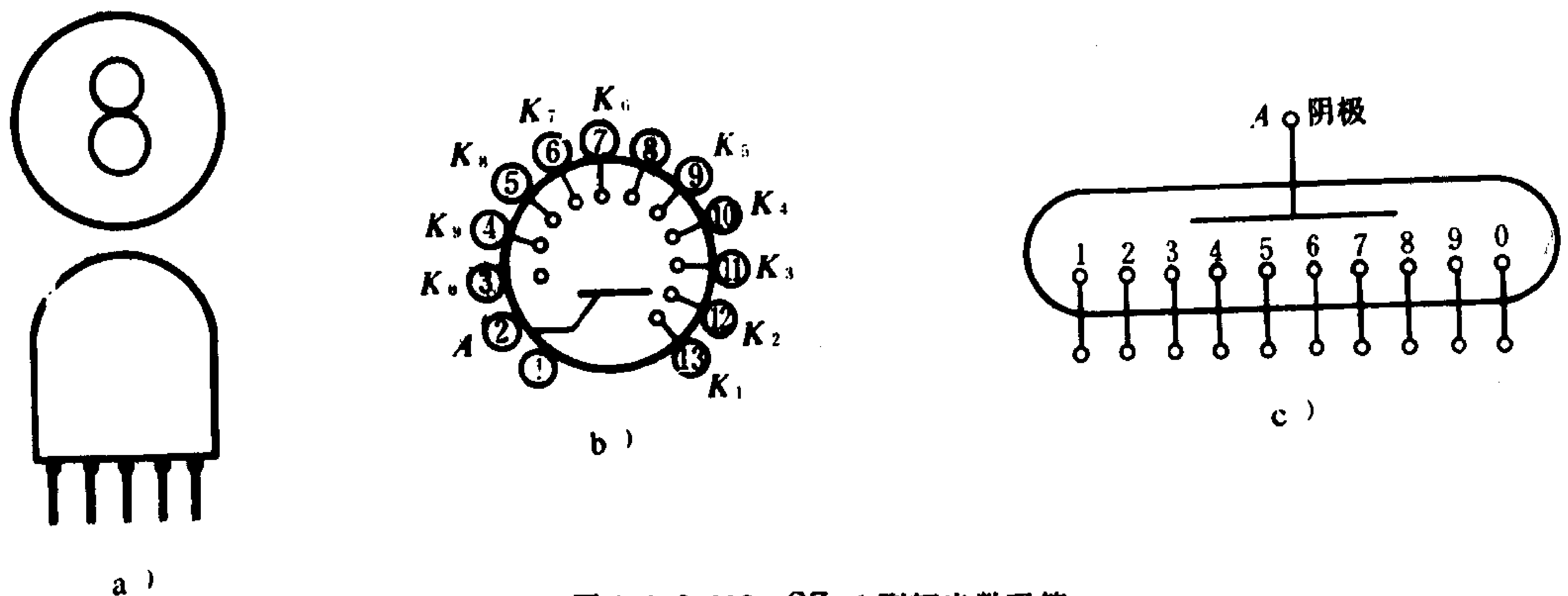


图 1.1.8-113　SZ-1 型辉光数码管
a)外形图；b)管脚图；c)符号图

公共的阳极A和十个阴极 $K_0\sim K_9$，这十个阴极分别做成 0， 1， 2 …… 9 十个数字的形状，它们互相重叠，中间留有较小空隙，阳极和阴极都封装在充有氖气的玻璃管内。当阳极和其中一个阴极同电源接通时，在该阴极周围出现辉光，便显示出一个数码。

2）译码器　辉光数码管的译码器有 0， 1， 2 …… 9 十个输出端，对应于十个十进制数码，接到数码管相应的阴极。译码器的输入端接到十进制计数器，如图 1.1.8-114 所示。译码器的逻辑图是根据逻辑关系式画出来的，表 1.1.8-26 为二—十进制译码器的逻辑真值表

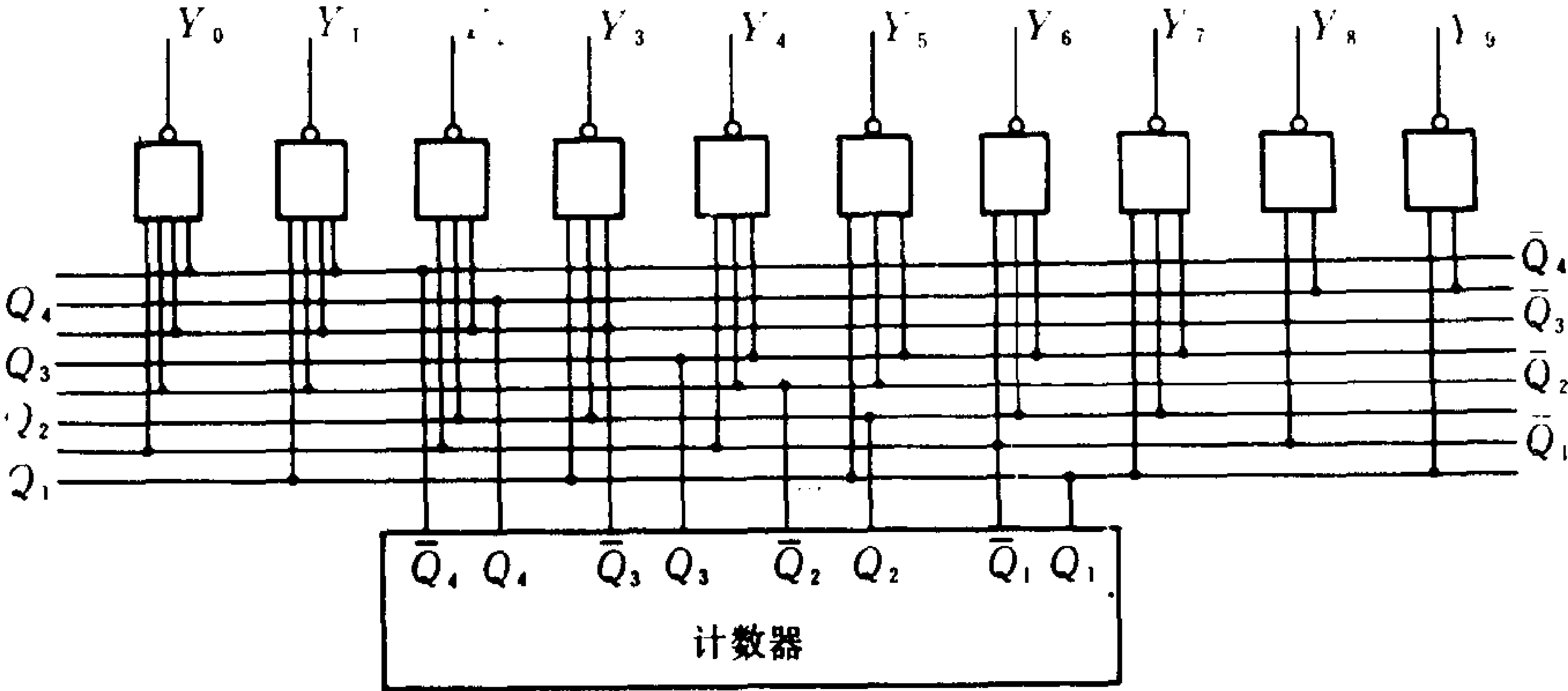


图 1.1.8-114　辉光数码管译码器逻辑原理图（与非门组成）

（输出为低电平有效）。根据真值表可得出其最简单的与非逻辑表达式：

$\overline{Y}_0=\overline{Q}_1\cdot\overline{Q}_2\cdot\overline{Q}_3\cdot\overline{Q}_4$　　$\overline{Y}_1=Q_1\cdot\overline{Q}_2\cdot\overline{Q}_3\cdot\overline{Q}_4$　　$\overline{Y}_2=\overline{Q}_1\cdot Q_2\cdot\overline{Q}_3$

$Y_0=\overline{\overline{Q}_1\cdot\overline{Q}_2\cdot\overline{Q}_3\cdot\overline{Q}_4}$　　$Y_1=\overline{Q_1\cdot\overline{Q}_2\cdot\overline{Q}_3\cdot\overline{Q}_4}$　　$Y_2=\overline{\overline{Q}_1\cdot Q_2\cdot\overline{Q}_3}$

$\overline{Y}_3=Q_1\cdot Q_2\cdot\overline{Q}_3$;　　$\overline{Y}_4=\overline{Q}_1\cdot\overline{Q}_2\cdot Q_3$;　　$\overline{Y}_5=Q_1\cdot\overline{Q}_2\cdot Q_3$

$Y_3=\overline{\overline{Q}_1\cdot Q_2\cdot\overline{Q}_3}$　　$Y_4=\overline{\overline{Q}_1\cdot\overline{Q}_2\cdot Q_3}$　　$Y_5=\overline{Q_1\cdot\overline{Q}_2\cdot Q_3}$

$\overline{Y}_6=\overline{Q}_1\cdot Q_2\cdot Q_3$　　$\overline{Y}_7=Q_1\cdot Q_2\cdot Q_3$　　$\overline{Y}_8=\overline{Q}_1\cdot Q_4$　　$\overline{Y}_9=Q_1\cdot Q_4$

$Y_6=\overline{\overline{Q}\cdot Q_2\cdot Q_3}$　　$Y_7=\overline{Q_1\cdot Q_2\cdot Q_3}$　　$Y_8\mp\overline{\overline{Q}_1\cdot Q_4}$　　$Y_9=\overline{Q_1\cdot Q_4}$

表 1.1.8-26　　二——十进制译码器真值表

十进制数	Q_4 Q_3 Q_2 Q_1	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
0	0 0 0 0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0 0 0 1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0 0 1 0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0 0 1 1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	0 1 0 0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
5	0 1 0 1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
6	0 1 1 0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
7	0 1 1 1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
8	1 0 0 0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
9	1 0 0 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

辉光数码管译码驱动电路（8421 BCD码）还可以采用二极管组成的与门电路及三极管来

实现。其电路结构简单，所以应用较多。见图 1.1.8-115

8.3.2 分段式数码管译码驱动电路

分段式数码管是利用不同发光段组合来显示不同的十进制数码的，其分段布置图如图 1.1.8-116 所示。为了使数码管能将数码所代表的数显示出来，必须将数码经译码器译出，然后经驱动器点亮对应的段，比如对于 8421 码的 0101 状态，对应的十进制数为 5，则译码驱动电路应使 a、c、d、f、g 五段点亮，即对应于某一组数码，译码器应有确定的几个输出端有信号输出，这是分段式数码管译码电路的主要特点，分段式显示器按其结构原理可分为半导体显示器、荧光数码管、液晶显示器等。

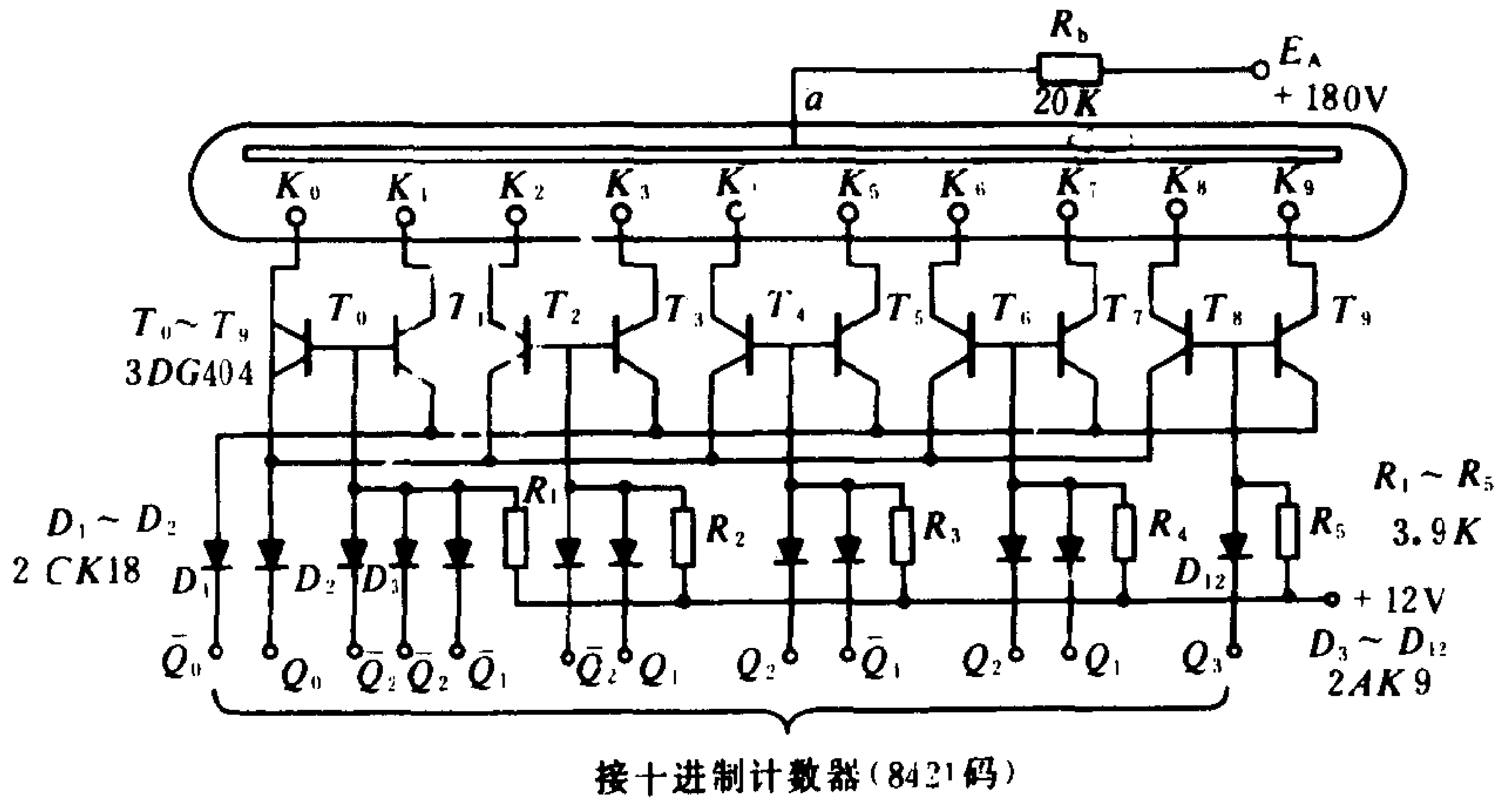


图 1.1.8-115 采用二极管、三极管组成的译码驱动电路

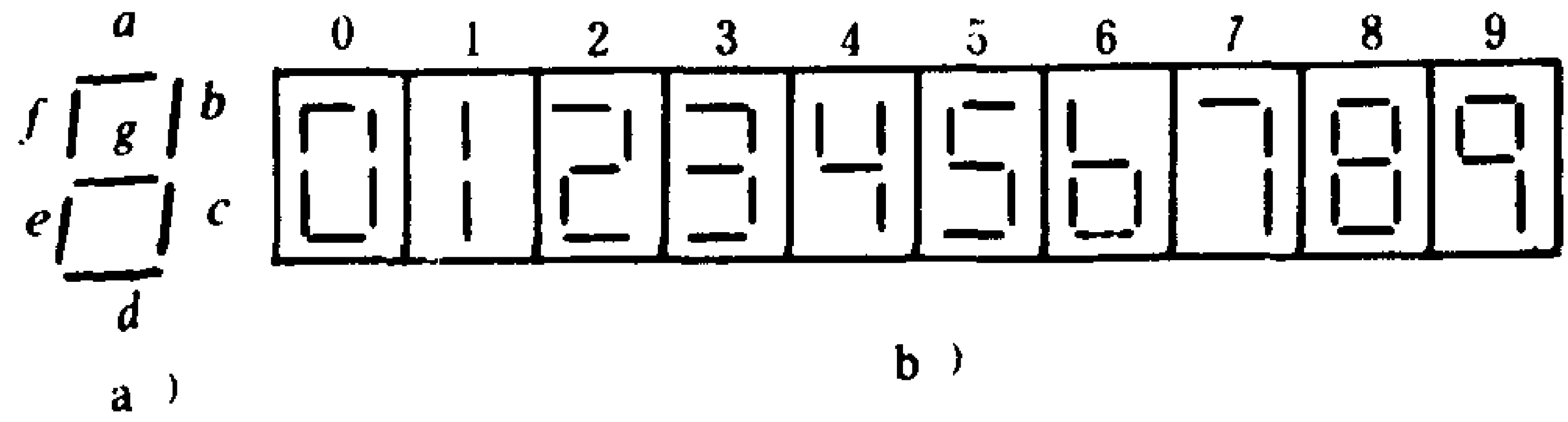


图 1.1.8-116 七段显示器
a)分段布置图；b)段组合图

1)显示器驱动电路

(1)半导体显示器 某些特殊的半导体材料，例如磷砷化镓作成的 PN 结，当外加正向电压时，可以将电能转换成光能，从而发出清晰悦目的光线，利用这样的 PN 结，既可以封装成单个的发光二极管，也可以封装成分段式的显示器件，如图 1.1.8-117 所示，其驱动电路可以采用三极管，也可以直接用 LTL 与非门驱动，其电路如图 1.1.8-118 所示。BS 为发光二极管(或数码管中的一段)，当与非门 M 输出为“0”或三极管 T 饱和导通时，发光二极管发光。

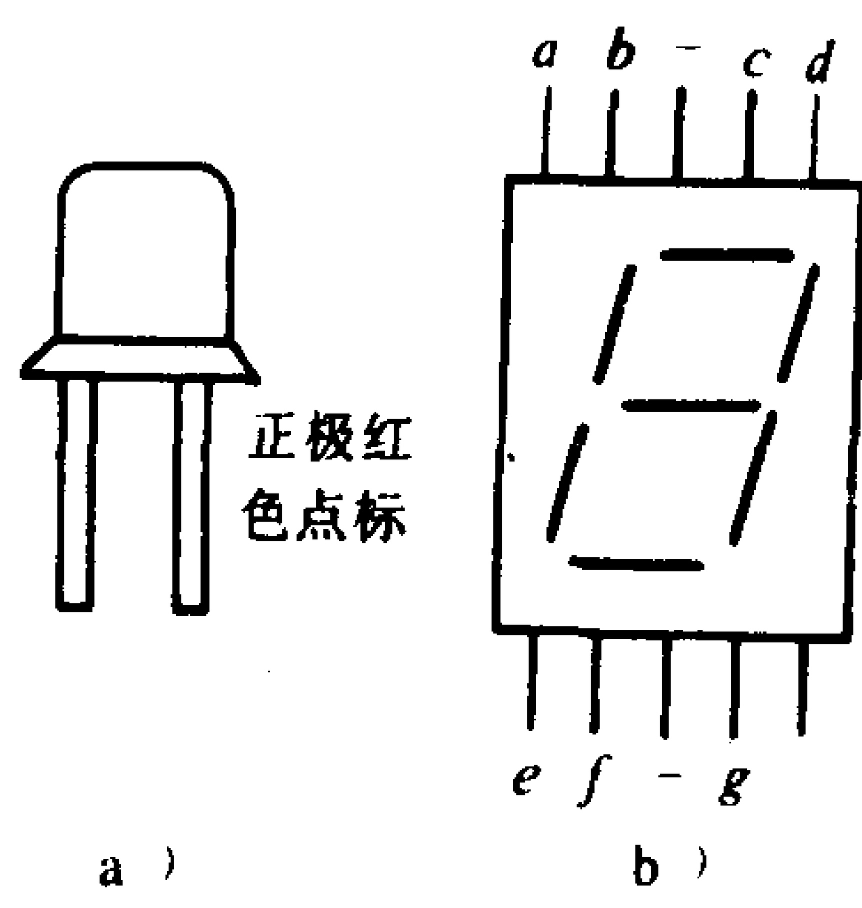


图 1.1.8-117 半导体显示器
a)发光二极管外形图；b)数码管

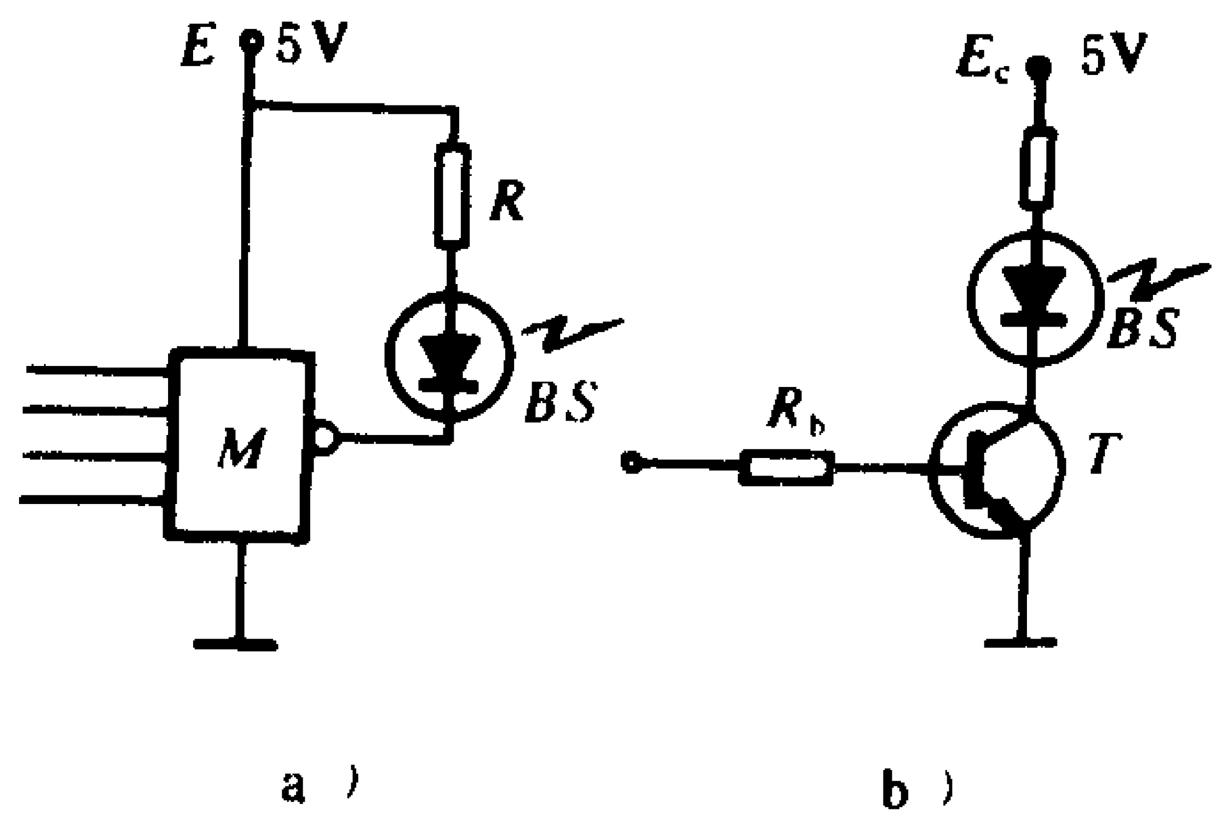


图 1.1.8-118 半导体显示器驱动电路
a)集成与非门驱动电路；
b)半导体三极管驱动电路

(2)荧光数码管 荧光数码管是一种分段式的真空管显示器件，如图 1.1.8-119 所示。它由灯丝(兼作阴极)、网状栅极和七段阳极组成。阴极加热后发射出来的电子经栅极电场加

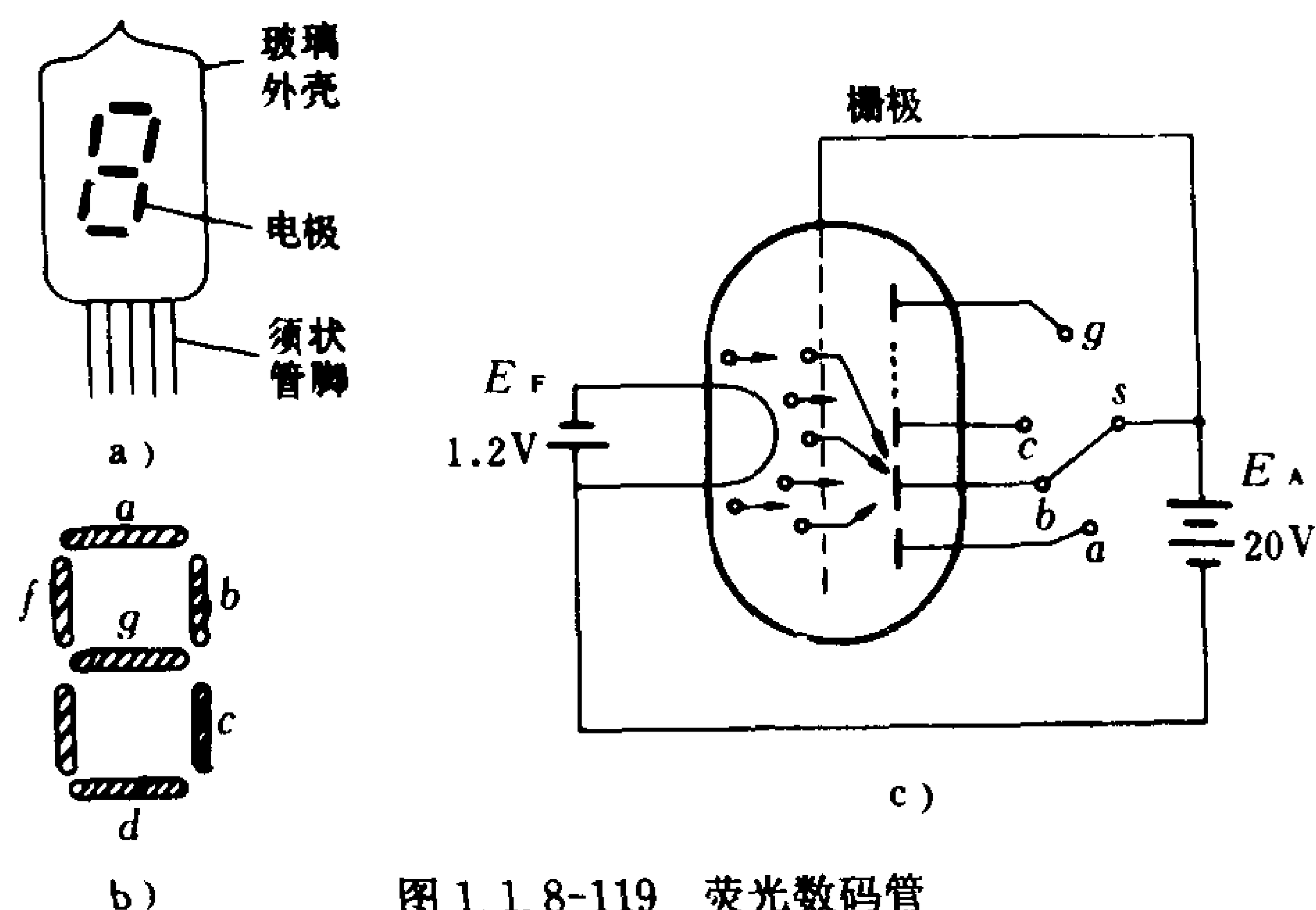


图 1.1.8-119 荧光数码管

a)外形图；b)阳极布置图；c)段发光示意图

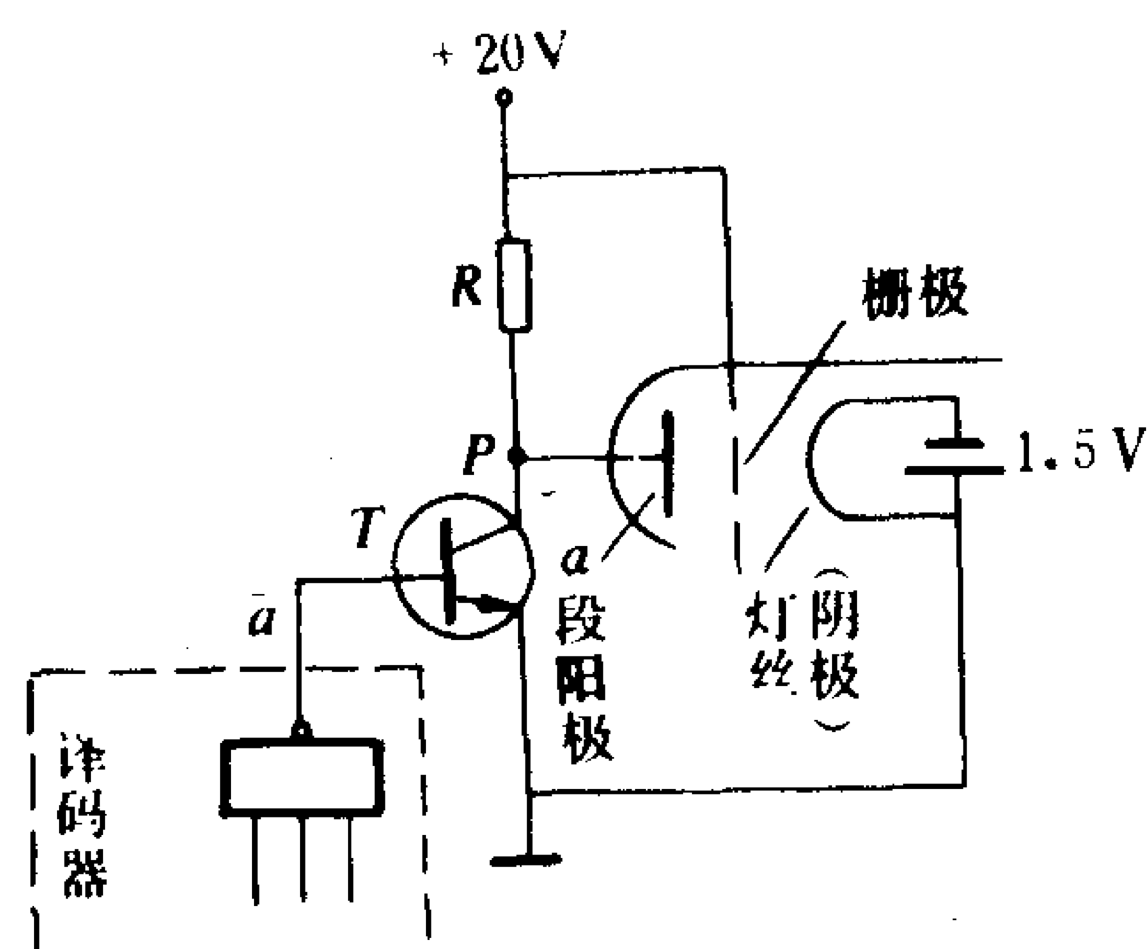


图 1.1.8-120 荧光数码管的驱动电路

速，然后再撞击到加有正电压的阳极上，于是涂在阳极上的氧化锌—荧光粉便发出绿色的荧光。其驱动电路如图1.1.8-120所示。

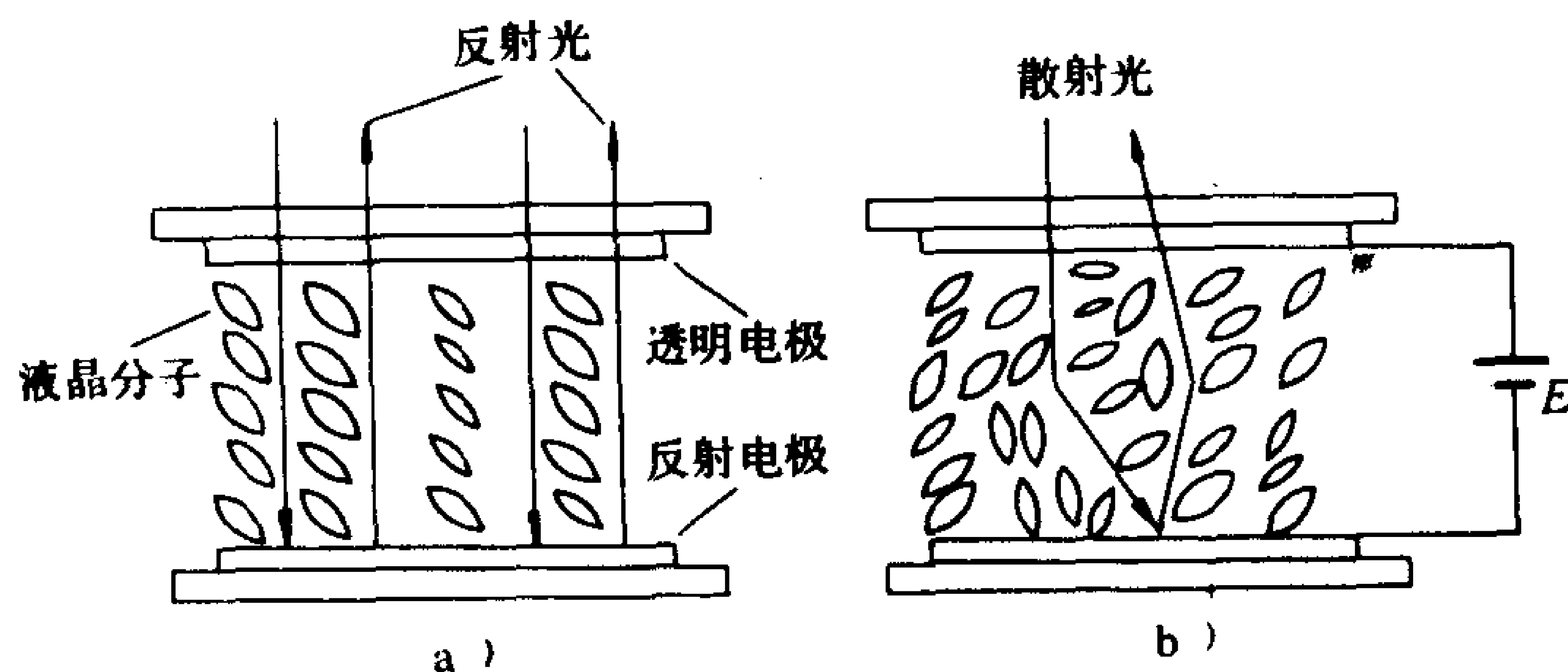


图 1.1.8-121 液晶显示的原理

a)液晶分子的正常整齐排列；b)液晶产生散射效应

（3）液晶显示器 液晶即液态晶体的简称，是一种有机化合物。它在电场的作用下，会产生各种电光效应。如图 1.1.8-121 a)所示，在两电极间夹持一薄层液晶，经特定处理，使液晶分子排列整齐，此时液晶对外部入射光没有散射作用，呈透明色，在电场的作用下，液晶中的离子（予先在液晶中掺杂质所形成）产生定向运动（如图 1.1.8-121 b)所示，在运动过程液晶分子受到碰撞而旋转，破坏了分子的整齐排列，成为无规则的紊乱状态。因此对外部入射光产生散射，原来透明的

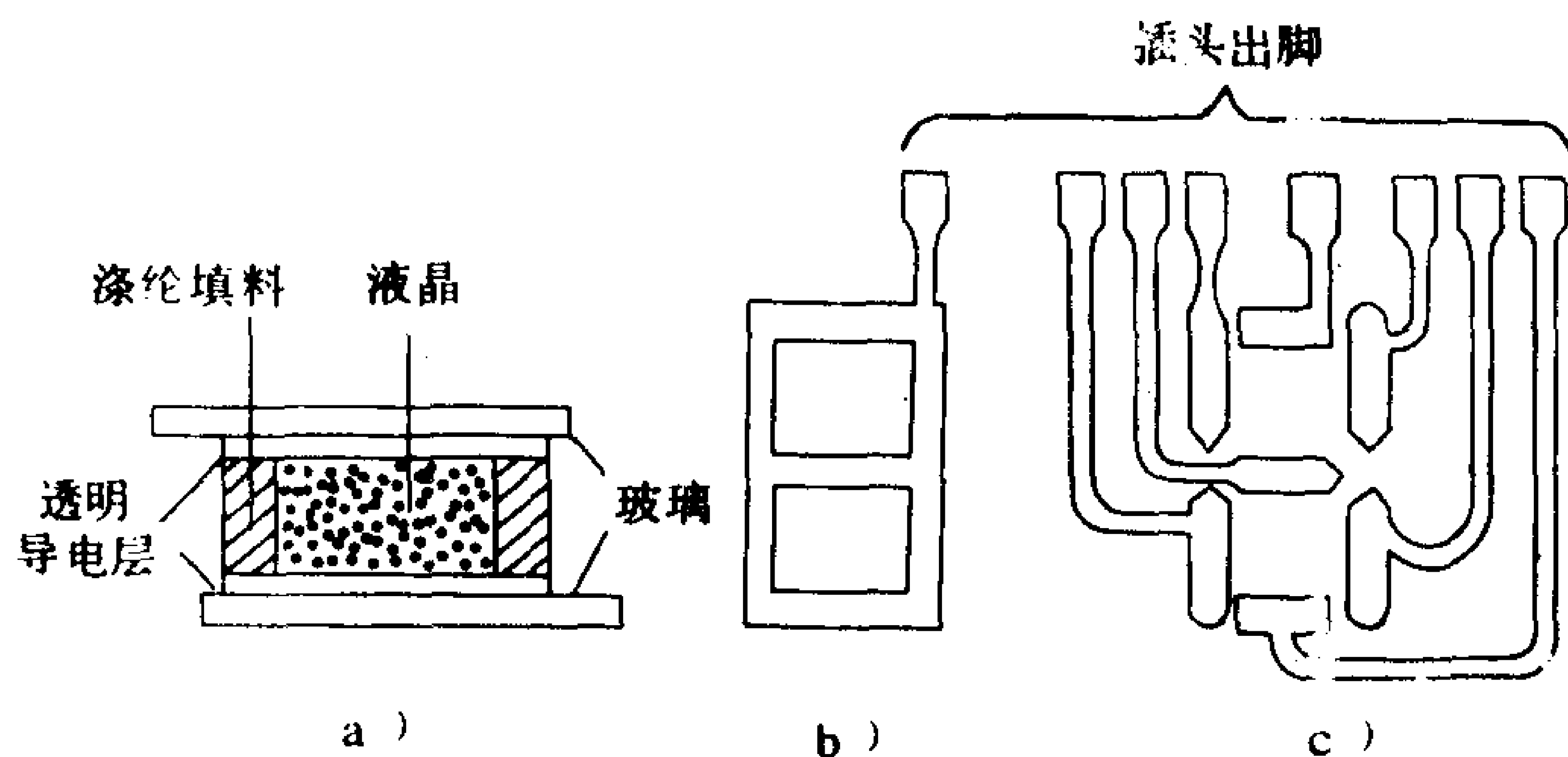


图 1.1.8-122 液晶显示器结构

a)液晶显示屏的截面；b)反面电极；c)正面电极

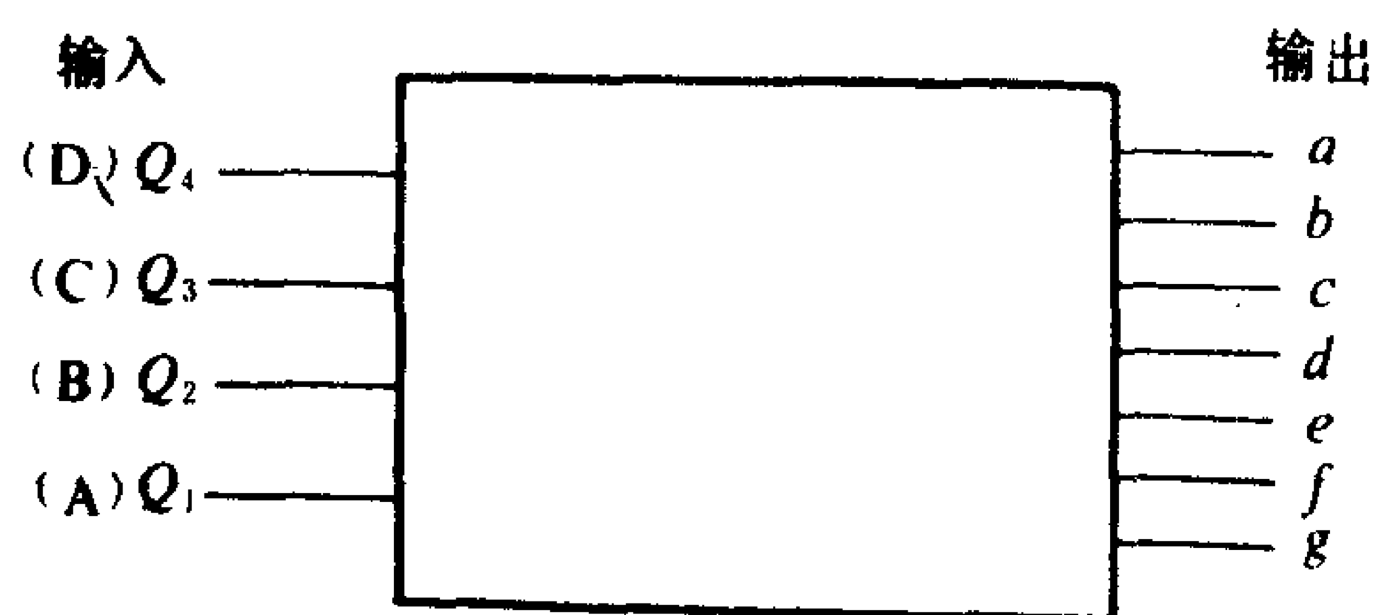


图 1.1.8-123 七段显示译码器输入输出示意图

液晶变成了乳白色。当再断开电极间的电压时，经短暂的延迟，液晶又重新恢复原来的整齐排列状态。利用液晶可制成分段式数码显示屏，它的结构如图 1.1.8-122 所示。它是在平整度很好的玻璃上喷上二氧化锡透明导电层，光刻成七段作正面电极，在另一块玻璃上对应的作成 8 字形反面电极，然后封装成间隙约为 10 μm的液晶盒，灌注液晶后密封即成，若在液晶显示屏的正面某段和反面电极间，加适当大小的电压，则该段所夹持的液晶产生散射效应，成为乳白色。这种显示器液晶本身不发光，它是借助自然光或外来光来显示数码的。目前多用于电子手表、时钟、数字仪表及数字计算器中。

2) 七段显示译码器　上述几种分段式显示器虽然结构及显示原理有所差异，但只要采用同样分段方式，其译码器都可按同一方法进行设计。设七段显示器分段布置图如上述图 1.1.8-116 所示，其中a、b、c、d、e、f、g分别代表各段，根据 8421 码的特点可列出译码器的真值表，见表 1.1.8-27。图 1.1.8-123 为译码器输入输出示意图。

表 1.1.8-27　**七段显示译码器真值表**

输入				输出						
(D) Q_4	(C) Q_3	(B) Q_2	(A) Q_1	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

低电平(0)时显示段亮、高电平(1)时灭。

为了便于用“与或非”门实现上述译码器的功能，可用卡诺图进行化简后得出最简单的“与或非”逻辑表达式：

a段　$a=\overline{D+B+CA+\bar{C}\bar{A}}$

b段　$b=\overline{\bar{C}+BA+\bar{B}\bar{A}}$

c段　$C=\overline{C+\bar{B}+A}$

d段　$d=\overline{D+\bar{C}B+B\bar{A}+\bar{C}\bar{A}+C\bar{B}A}$

e段　$e=\overline{\bar{C}\bar{A}+B\bar{A}}$

f段　$f=\overline{D+C\bar{B}+C\bar{A}+\bar{B}A}$

g段　$g=\overline{D+C\bar{B}+\bar{C}B+B\bar{A}}$

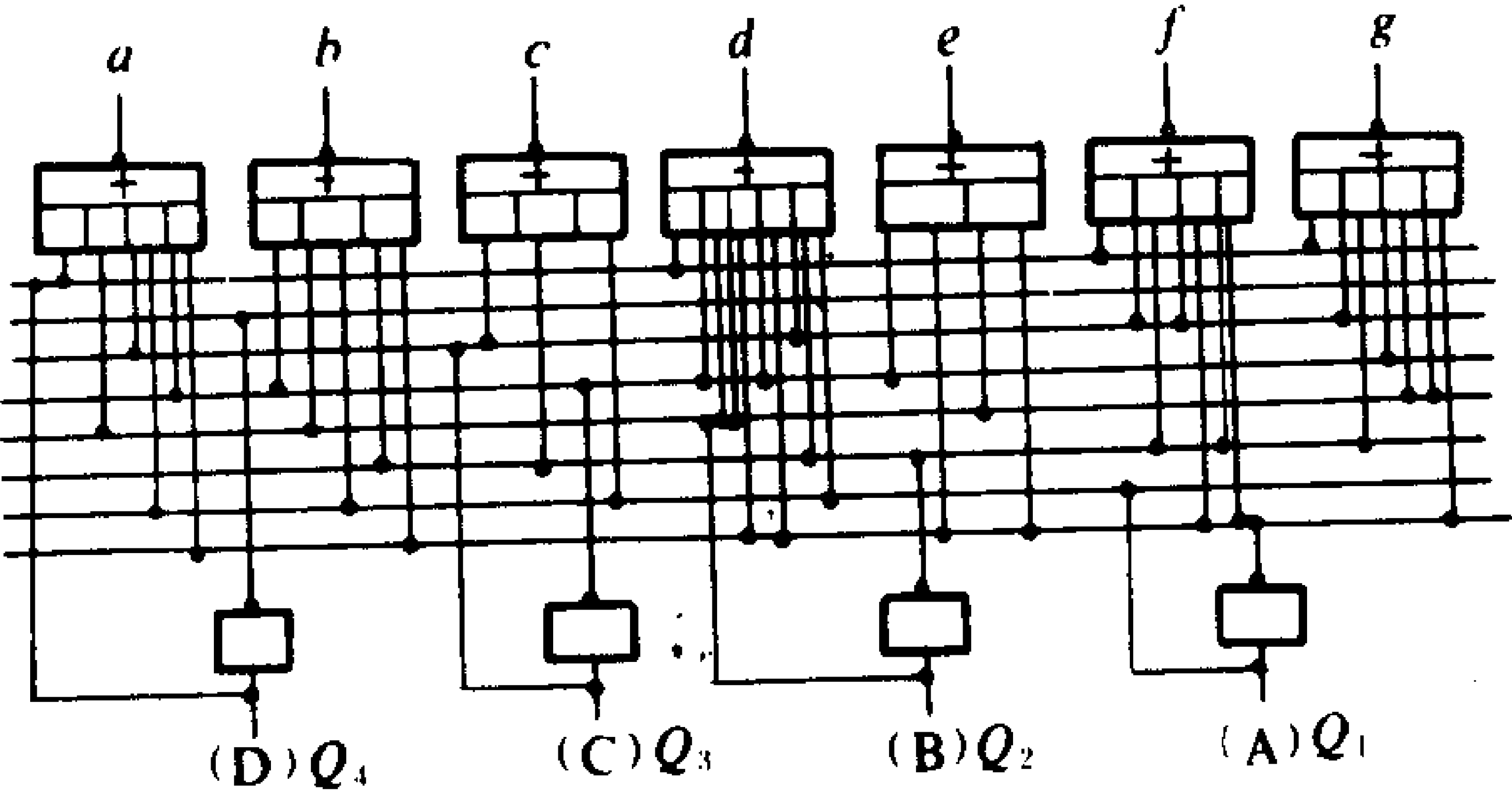


图 1.1.8-124　七段显示译码器逻辑原理图

其对应的逻辑原理图如图 1.1.8-124 所示。

3) 中规模集成的二—十进制七段显示译码器　由于译码器在数字系统中的应用日益广泛，目前已把它作为一个标准器件制成中规模集成电路。这种译码器也是由各种门电路（“与非”、“与或非”组成的。它包括译码电路、驱动电路和辅助控制电路。译码电路及驱动电路与上述有关电路类同。下面仅对辅助控制电路做一简要介绍。图 1.1.8-125 为该译码显示电

路的方块图。

（1）试灯输入信号　其引线端为$\overline{LT}$，它的作用是测量数码管的好坏。只要$\overline{LT}=0$，无论输入为任何数码数码管的七段全亮，说明数码管是好的。

（2）灭零输入信号　其引线端为$\overline{RBI}$当$\overline{RBI}=0$，且输入数码为0000时，数码管不显示任何数字，但输入其它数码时，数码管仍照常显示。这就实现了灭零的目的。

（3）熄灭输入信号　因为灭零输出也用这一端，所以图中引线端用$\overline{RI}/\overline{RBO}$表示。当这一端输入低电平信号$\overline{RI}=0$时，不论输入什么数码，七段的输出全部为0，不显示任何数字，这样可以控制数码管按照我们的要求进行工作或熄灭。

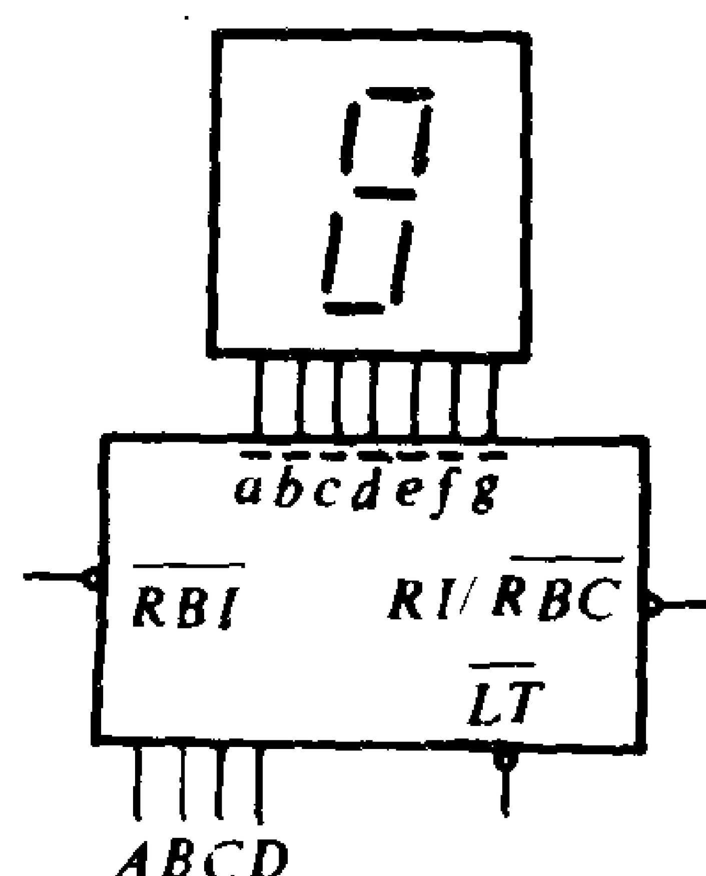


图 1.1.8-125　中规模集成的七段译码器方块图

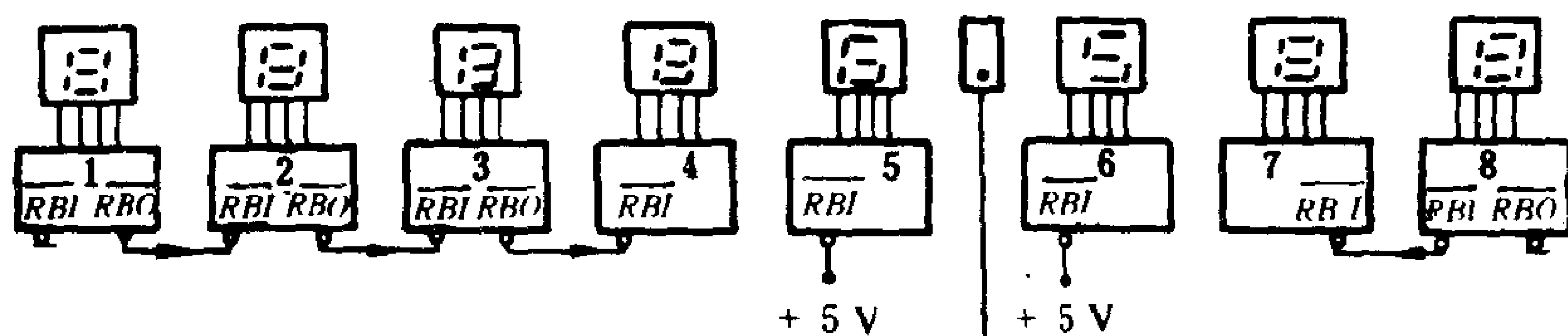


图 1.1.8-126　八位数码显示系统

（4）灭零输出信号　引线端为$\overline{RBO}$，当$\overline{RBO}=0$，且输入数码$DCBA=0\ 0\ 0\ 0$时，从$\overline{RBO}$输出一个低电平信号。在多位数的显示系统中，可以利用灭零输出信号把数字前部和尾部多余的"0"熄灭，这样既便于读取结果，又可减少电源的消耗。图1.1.8-126是一个八位数码显示系统的例子。其中每一位数所用的译码器都是中规模集成电路(如图1.1.8-125)，假定需要显示6.5，如果让八位数码管全部亮，则显示00006.500字样，显然，前面四个零和尾部两个零是多余的，为了熄灭这些不必显示的"0"，可以将各片间联成图1.1.8-126所示形式。这样就可以只显示6.5数字。

8.4　数码比较器

在各种数字系统中，尤其是计算机中，经常需要比较两个数字大小，这种电路称为数码比较器。

8.4.1　同比较器

比较两个数字是否相同的数码比较器叫做同比较器。一位二进制数码"同"的逻辑表达式为：

$$g_i=a_i\cdot b_i+\overline{a}_i\cdot\overline{b}_i=\overline{a_i\oplus b_i}。\quad(1.1.8\text{-}57)$$

式中，a_i、b_i分别表示两个数中对应的一位数码，g_i表示输出。其真值表见表1.1.8-28，逻辑图如图1.1.8-127所示。它是由一个异或非门（同或门）来实现。实际应用中也可以用"与非"门，"或非"门来实现。对于四位同比较器，则要求每一位的比较结果都相同，所以比较结果为：

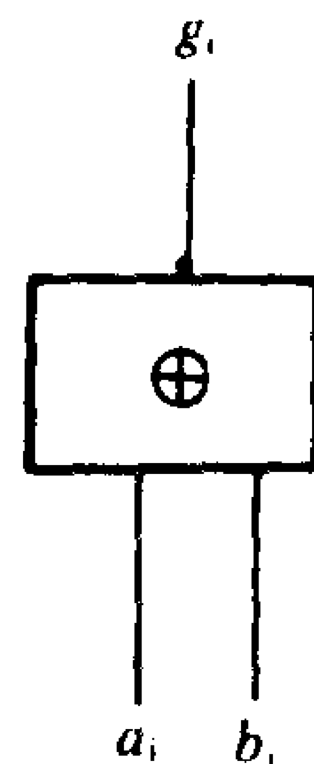


图 1.1.8-127
同比较器逻辑图

$$G = g_3 \cdot g_2 \cdot g_1 \cdot g_0 = (\overline{a_3 \oplus b_3}) \cdot (\overline{a_2 \oplus b_2}) \cdot (\overline{a_1 \oplus b_1}) \cdot (\overline{a_0 \oplus b_0}) \quad (1.1.8\text{-}58)$$

表 1.1.8-28　　同比较器真值表

输入		输出
a_i	b_i	g_i
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

8.4.2　大小比较器

比较两个数字大小的比较器叫做大小比较器。一位数码比较大小的结果有三种可能：

若$a_i > b_i$（即$a_i = 1$，$b_i = 0$），则代表 $a_i > b_i$ 的输出信号为 $x = 1$，$y = 0, z = 0$，（封锁下一位的比较门）。

若$a_i < b_i$(即$a_i = 0$，$b_i = 1$)，则代表$a_i < b_i$的输出信号$x = 0$，$y = 1$，$z = 0$(封锁下一位的比较门)。

若$a_i = b_i$(即$a_i = 0$、$b_i = 0$ 或$a_i = 1, b_i = 1$)，则代表$a_i = b_i$的输出信号$x = 0, y = 0, z = 1$(开启下一位比较门，逐次比较)，其真值表见表 1.1.8-29。图 1.1.8-128 为其对应的逻辑原理图。

表 1.1.8-29　　大小比较器真值表

输入		输出		
a_i	b_i	x	y	z
0	0	0	0	1
0	1	0	1	0
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1

多位数码比较的规则：首先比较最高位，最高位如不一样，比较结果是整个数的比较结果，最高位如果相同，则依次比较下一位，以决定两位数的大小。

8.5　运算器

数字计算机的基本任务之一是进行算术运算，而在机器中加、减、乘、除四则运算都是分解为加法运算来进行的，所以加法器是计算机中最基本的运算单元。

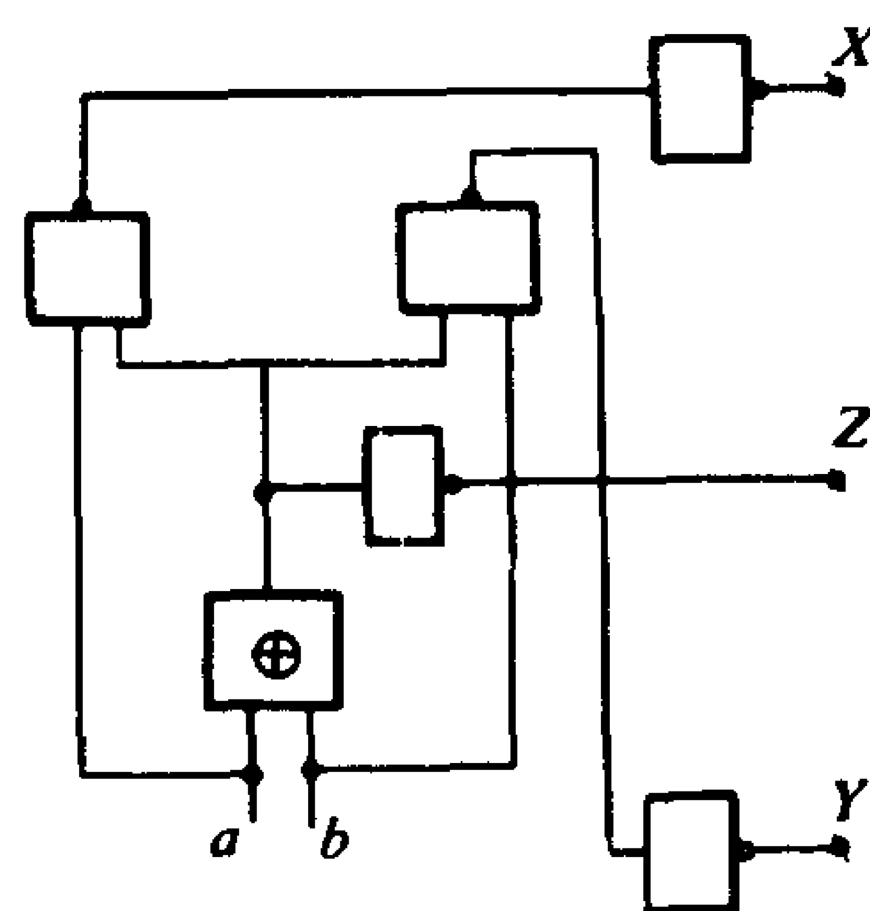


图 1.1.8-128

大小比较器逻辑原理图

8.5.1　半加器

两数相加的结果只由两数决定，不考虑低位进位的加法运算电路称为半加器。表 1.1.8-30 是两个一位二进制数半加器的真值表。其中$S_n = a_n \cdot \overline{b}_n + \overline{a}_n \cdot b = a_n \oplus b_n$；$c_n = a_n \cdot b_n$。$S_n$表示半加和，$c_n$表示进位。半加和可以用异或门实现，进位为与门关系。其逻辑图如图 1.1.8-129 所示

表 1.1.8-30 半加器真值表

输入		输出	
a_n	b_n	s_n	c_n
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

8.5.2 全加器

两数相加的结果不仅由两数决定，还要考虑低位进位的运算电路叫全加器。全加器是电子数字计算中不可缺少的一种逻辑电路。表 1.1.8-30 为其真值表，其中a_n、b_n表示两个加数，c_{n-1}表示来自低位的进位，s_n、c_n 表示相加后之和与向高位的进位。图 1.1.8-131 为其逻辑原理图。它是由两个异或门、一个“与或非”门和一个反相器组成。

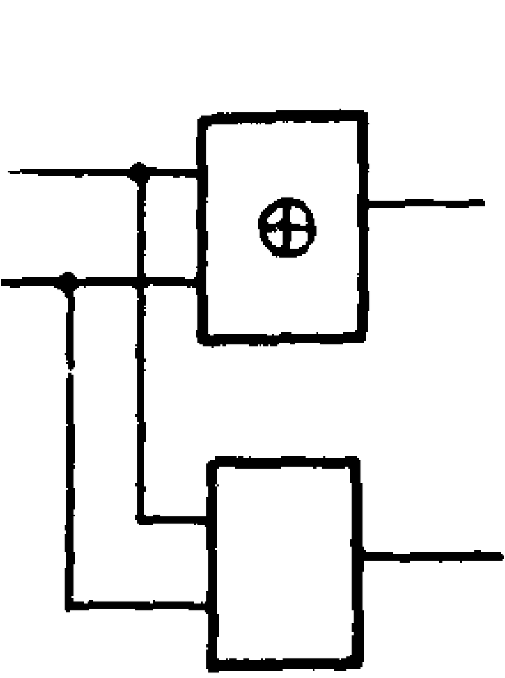


图 1.1.8-129 半加器逻辑图

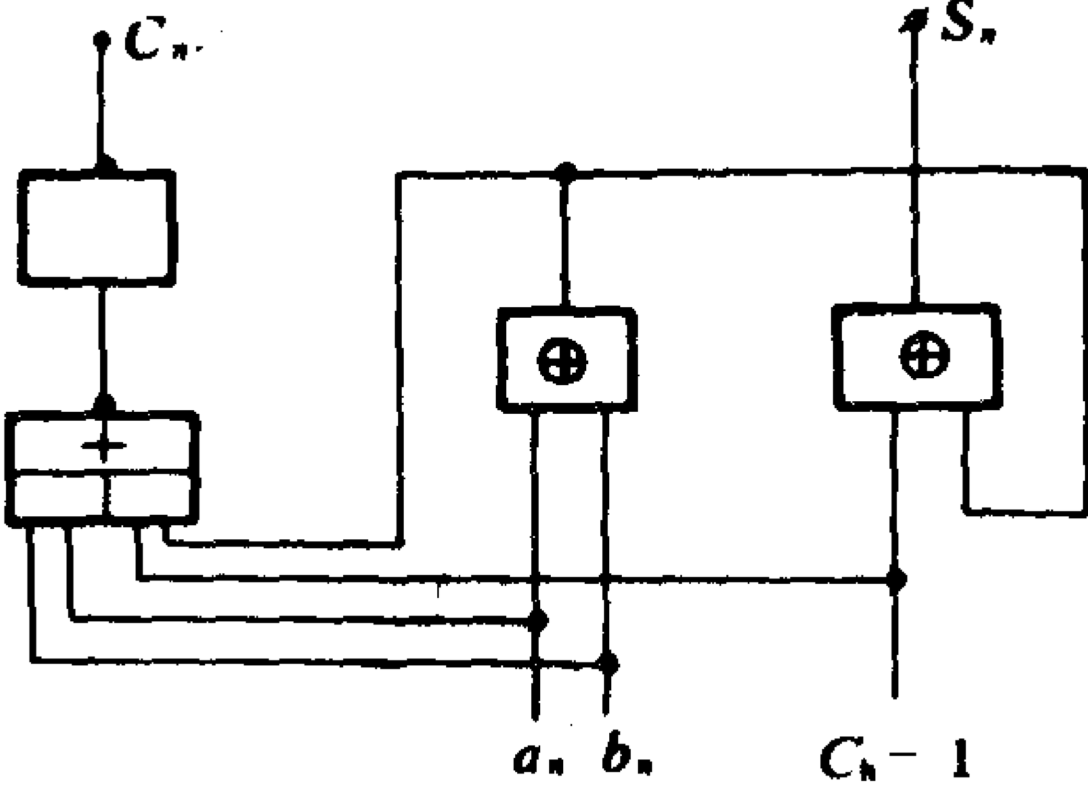


图 1.1.8-130 全加器逻辑原理图

表 1.1.8-31 全加器真值表

输入			输出	
a_n	b_n	c_{n-1}	s_n	c_n
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

s_n和c_n的逻辑表达式为

$$s_n=(a_n\oplus b_n)\overline{c}_{n-1}+\overline{a_n\oplus b_n}c_{n-1}$$

$$=(a_n\oplus b_n)\oplus c_{n-1} \tag{1.1.8-59}$$

$$c_n=a_nb_n+c_{n-1}(a_n\oplus b_n) \tag{1.1.8-60}$$

9 脉冲电路

产生和变换脉冲波的电路叫做脉冲电路。

9.1 二极管限幅电路

在脉冲数字技术中，限幅电路的应用是很广泛的。组成限幅电路的基本元件可以是半导体二极管，稳压管及晶体管。它们都是利用管子所具有的特性，将输波形需要部分留下，不需要的部分去掉。所以限幅器又有“削波电路”和“幅度选择电路”之称。表 1.1.8-32 列出由二极管组成的限幅电路。

表 1.1.8-32 **二极管限幅电路**

电路名称		电路图	波形图 输入(v_i)	波形图 输出(v_0)	说明
串联限幅电路	下限电平为 0				利用二极管截止进行限幅，二极管反接，则为上限幅。
串联限幅电路	下限电平为E				二极管反接，则为上限幅，改变E的大小和极性可以改变限幅电平
并联限幅电路	下限电平为 0				利用二极管的导通，进行限幅，二极管反接，则获得上限幅
并联限幅电路	下限电平为E				二极管反接，则获得上限幅，改变E的大小和极性可以改变限幅电平。
双向限幅	上、下限电平均为E				改变E的大小可以改变上、下限幅电平。

9.2 脉冲波的产生

在脉冲数字系统中，经常要碰到脉冲波的产生、整形、延迟等问题，实现这些作用的单元电路有单稳态触发器、多谐振荡器(无稳态触发器)和施密特触发器等。组成以上各触发器可用分立元件、集成与非门电路及定时器。

9.2.1 用集成与非门组成的触发器和多谐振荡器见表 1.1.8-33。

9.2.2 用定时器组成的脉冲产生与整形电路

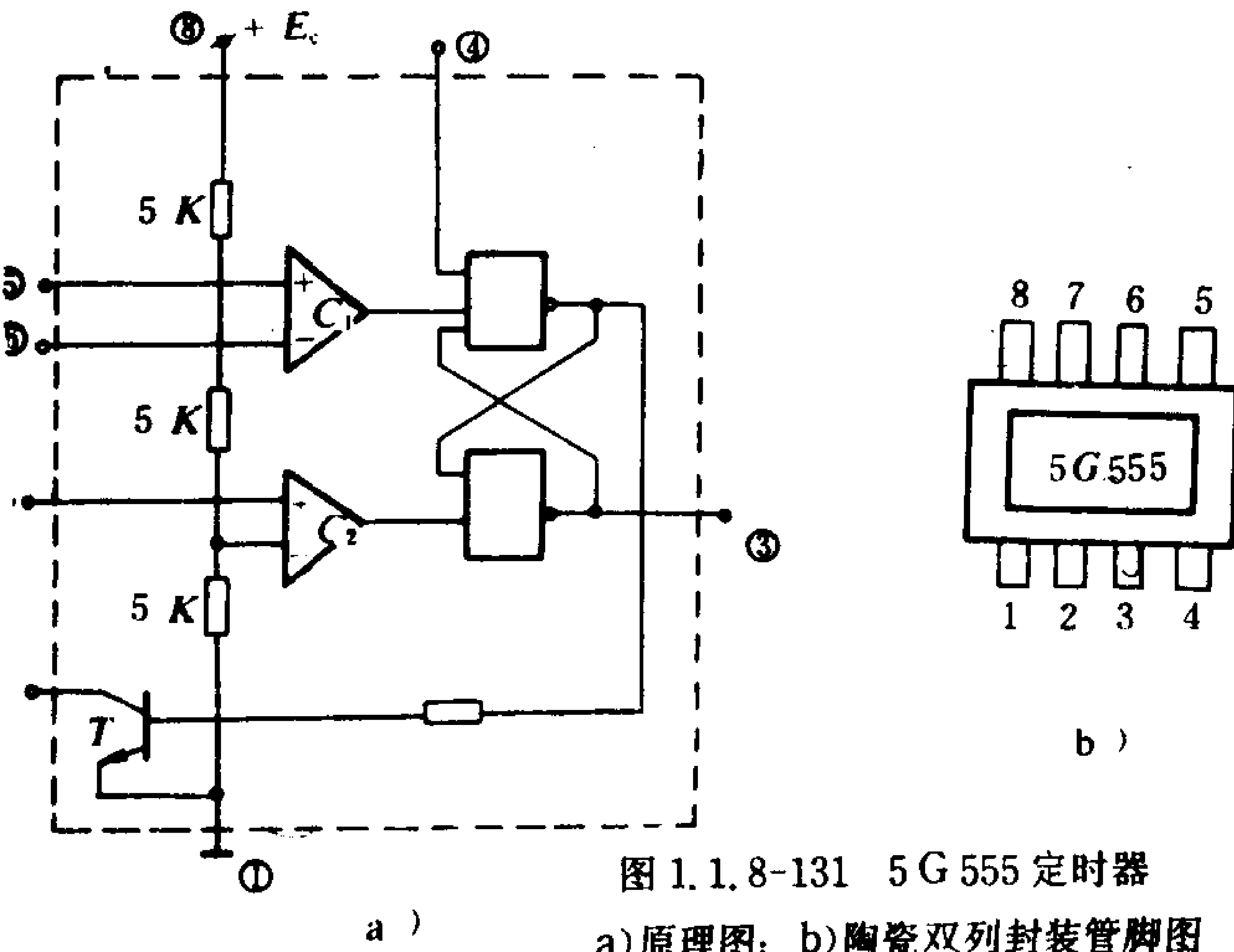


图 1.1.8-131 5G555 定时器
a)原理图；b)陶瓷双列封装管脚图

5G555 定时器 5G555 是一种双

表 1.1.8-33　**用集成与非门组成的触发器和多谐振荡器**

	单稳态触发器	多谐振荡器	施密特触发器
电路形式	1. 微分型 C 0.01μf, $R=470\,\Omega$, U_i, U_o 2. 积分型 R 200Ω, C 5100P, U_i, U_o	1. RC环形多谐振荡器 C-0.047μf, R 300Ω, R_s 100Ω, U_o 2. 接有射极跟随器的RC环形振荡器 C, 10K, T, +15V, R_e, U_o	1. 用基本RC触发器作为基本单元，再配以电平转移。 U_i, U_{o1}, U_{o2} 2. 利用射极跟随器输出分压，改变滞后电压。 +5 V, 2.2K R_{b1}, T, U_i, 100Ω R, 3.3K R_{b2}, 100Ω R_2, U_{o1}, U_{o2}
稳定状态	一个稳态和一个暂稳态	两个暂稳态	两个稳态
转换情况	在外触发信号作用下进入暂稳态，然后通过电容充放电又自动回到稳态。	不需加触发信号。依赖延时环节的控制作用，使开关环节周期性地开通和关闭。	依赖于外触发信号一定电平，才能翻转而且新的稳态的存在还得由外触发信号一定电平来维持。
主要用途	整形、延时、定时	产生方波	鉴幅、波形变换、整形
输出脉冲宽度或周期的分析计算	1．微分型 根据简单RC电路瞬态过程的分析，得 $t_{po}(\text{脉宽})=\tau\ln\frac{V_R(\infty)-V_R(0^+)}{V_R(\infty)-V_R(T_{po})}$ $\tau=R\cdot C$;　$V_R(\infty)=0$; $V_R(0^+)=3.1\,V$;　$V_R(t_{po})=1.4\,V$ 则 $t_{po}=0.8(^*R_0+R)C$ 2．积分型 分析方法同上，可得 $t_{po}\approx1.2R.C$　$R>100\,\Omega$ * R_0为与非门关闭后等值电源内阻取为 100 Ω。	U_o, T_1, T_2, t 周期 $T=T_1+T_2$ $T_1=\tau\ln\frac{V_R(\infty)-V_R(0^+)}{V_R(\infty)-V_R(T_1)}$ $V_R(\infty)=0.45\,V$，$V_R(0^+)=3.5\,V$ $V_R(T_1)=1.4\,V$ 得：$T_1=1.17(^*R_0+R)C$ 同理 $T_2=0.83(^*R_0+R)C$ $T=T_1+T_2\doteq2(^*R_0+R)C$ R在 100 至 1 KΩ范围变化	

该型集成器件，其内部原理电路如图 1.1.8-131 a)所示。其管脚图如图 1.1.8-131 b)所示。从图中可知 5G555 包括一个三极管 T，两个电压比较器C_1和C_2，一个基本$R-S$触发器，及三个电阻值为 5 KΩ的电阻组成的分压器。这种定时器同样可以组成单稳，多谐振荡器及施密特触发器。它们的电路形式见表 1.1.8-34。

表 1.1.8-34　　　　定时器组成的触发器和多谐振荡器

单稳态触发器	多谐振荡器	施密特触发器
$+E_c(+5\text{V})$, R, C, 3, 4, 3, 7, 6, 5, 2, 1	$+E_c(+5\text{V})$, R_1, R_2, C, 8, 4, 7, 3, 6, 2, 1, U_0	$+E_{c1}$, $+E_{c2}$, R_1, R_4, U_{02}, C, U_i, R_2, R_3, 8, 4, 3, 7, 6, 5, 2, 1, U_{01}
输出电压 V_0的脉宽 $t_{p0}\doteq 1.1RC$	输出电压 V_0的频率 $f=\dfrac{1.43}{(R_1+2R_2)C}$	①如果输入信号 V_i为一三角波，则输出端 V_{01}为方波。 ②如果放电端 7 外接电阻R_4接入另一电源 E_{c2}，则可实现电平转移，（输出端 V_{02}）

10　直流电源

半导体直流电源方框图如图 1.1.8-132 所示。

10.1　整流电路结构形式与主要参数

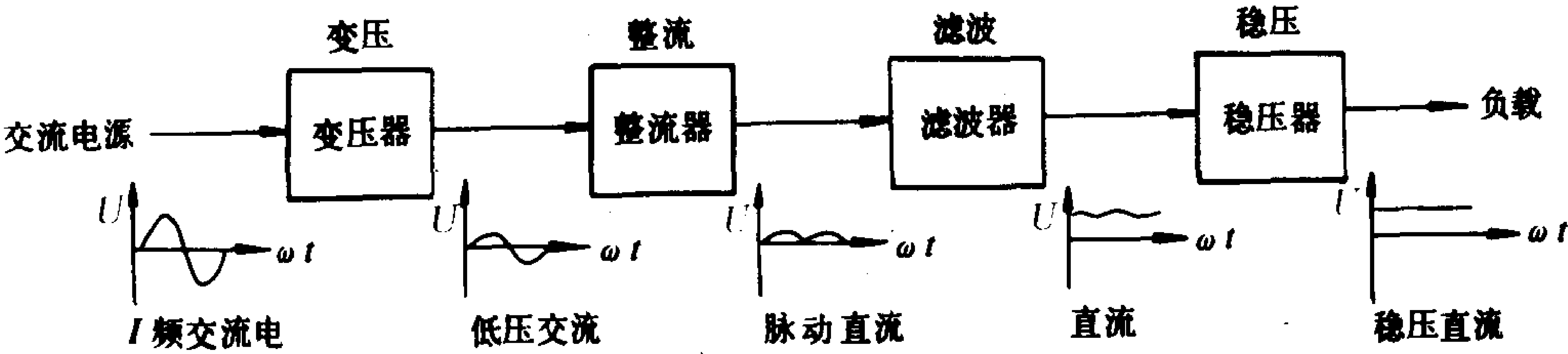


图 1.1.8-132　半导体直流电源方框图

表 1.1.8-35 为整流电路结构形式与主要参数。

10.2　倍压整流

要得到高电压小电流的直流电压，采用倍压整流电路比较合理，其电路如图 1.1.8-133 所示。图中每个二极管所承受的最大反向电压均为$2\sqrt{2}V_2$而电容C_1的最大电压为$\sqrt{2}V_2$，其余电容的最大电压均为$2\sqrt{2}V_2$。其倍压原理可根据电容的充放电特性进行分析。

表 1.1.8-35　　**半导体整流电路**

电路结构	负载	单相半波	单相全波	单相桥式	三相半波	三相桥式
电路原理图						
输出电压波形						
负载端平均电压U_d	R	$0.45U_2$	$0.9U_2$	$0.9U_2$	$1.17U_2$	$2.34U_2$
变压器次级相电压U_2	$R.L$	$2.22U_d$	$1.11U_d$	$1.11U_d$	$0.855U_d$	$0.428U_d$
变压器次级相电流I_2	R	$1.57I_d$	$0.785I_d$	$1.11I_d$	$0.587I_d$	$0.294I_d$
	L	$1.41I_d$	$0.707I_d$	I_d	$0.578I_d$	$0.289I_d$
整流二极管平均电流I_d	$R.L$	I_d	$0.5I_d$	$0.5I_d$	$\frac{1}{3}I_d$	$\frac{1}{3}I_d$
整流二极管承受最大反向电压U_{OM}	$R.L$	$\sqrt{2}U_2(3.14U_d)$	$2\sqrt{2}U_2(3.14U_d)$	$\sqrt{2}U_2(1.57U_d)$	$2.45U_2(2.09U_d)$	$2.45U_2(1.05U_d)$
变压器次级的功率（伏安）	R L	$3.49P_d$ $3.14P_d$	$1.75P_d$ $1.57P_d$	$1.23P_d$ $1.11P_d$	$1.51P_d$ $1.48P_d$	$1.05P_d$ $1.05P_d$

说明：①表中负载平均电流$I_d=\frac{U_d}{R}$，负载功率$P_d=U_d\cdot I_d$，R为负载电阻。

②单相半波，单相桥式整流电路宜用于小功率负载，大功率负载一般采用三相整流电路。

10.3　平滑滤波器

滤波的作用就是把整流后还含有的交流分量滤掉。滤波效果好坏，常用脉冲系数S 或纹波因数r来衡量

$$S=\frac{\text{输出电压最低次频率谐波分量的幅值}}{\text{输出电压的直流分量}}$$

$$r=\frac{\text{负载上交流分量的有效值}}{\text{直流分量}}$$

从表达式中不难看出$S.r$越小，说明滤波效果越好。

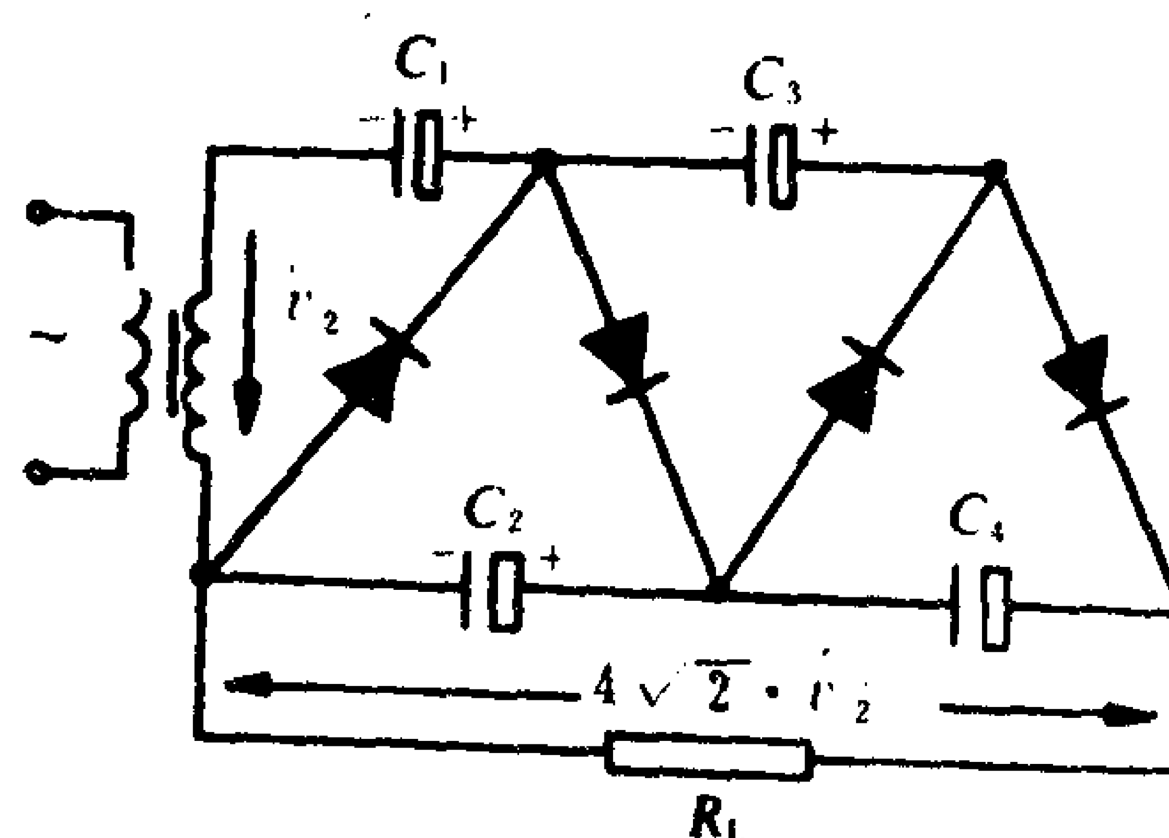


图 1.1.8-133　多倍压整流电路

10.3.1　电容滤波器及电感滤波器的分析，见表1.1.8-36.

表 1.1.8-36

	电容滤波器		电感滤波器	
电路原理图	U_i C R_L U_o	U_i C R_L U_0	L U_i R_L U_o	L U_i R_L U_o
波形图	U_i ωt U_o U_o ωt	U_i ωt U_o U_o ωt	U_i ωt U_o I_o ωt	U_i ωt U_o I_o ωt
外特性及滤波特性	U_i $\sqrt{2}U_i$ 0.9 U_i 全波 0.45 U_i 半波 I_0 外特性	S 157% 半波 67% 全波 I_0 电容滤波特性	U_i 全波 I_0 外特性	S 67% 全波 I_0 电感滤波特性
	U_d(平均值)=(1.1~1.2)U_i		U_d(平均值)=0.9U_i	
参数选择	$C=\frac{\sqrt{2}}{2\pi f R_L r}=\frac{4.5}{R_L r}$(微法) r：纹波因数　R_L：负载电阻		当整流电压脉冲频率高时(如三相桥式整流)L可选得小些L一般在几百毫亨至几毫亨。	
特　点	1．输出电压较高。 2．在小电流时滤波效果较好。 3．带负载能力差。负载电流加大时，输出电压降低，纹波加大。 4．电源起动时，由于电容C的作用，有较大的冲击电流。 5．适用于负载电流较小的场合。		1．带负载能力大些，负载电流加大时输出电压基本不变，纹波因数反而小，所以在大电流时滤波效果较好。 2．没有冲击电流的损害。 3．在负载电流大的情况下需要体积和重量很大的电感线圈。 4．当负载电流突然变动时，电感上产生的反电势可能击穿稳压电源的调整管。 5．适用于负载电流大的场合，尤其可控硅电源中应用较多。	

10.3.2　复式滤波器的分析见表 1.1.8-37

10.3.3　有源滤波电路　在$RC\pi$型滤波电路中，RC值越大，滤波效果愈好，但是R过大所产生的直流电压损失也很大，电容C选择过大也会相应增大体积的重量，为此，通常采用由三极管组成的有源滤波电路解决这个问题，图 1.1.8-134 为有源滤波器。它是利用三极管的电流放大作用，把通过射极的负载电流减小到$\frac{I_e}{(1+\beta)}$以后，在基极电路内加以滤波。这种滤波器具有很好的滤波效果，同时滤波电容的容量、体积和成本都减小。这种电路在小型电子设备中应用较普遍。

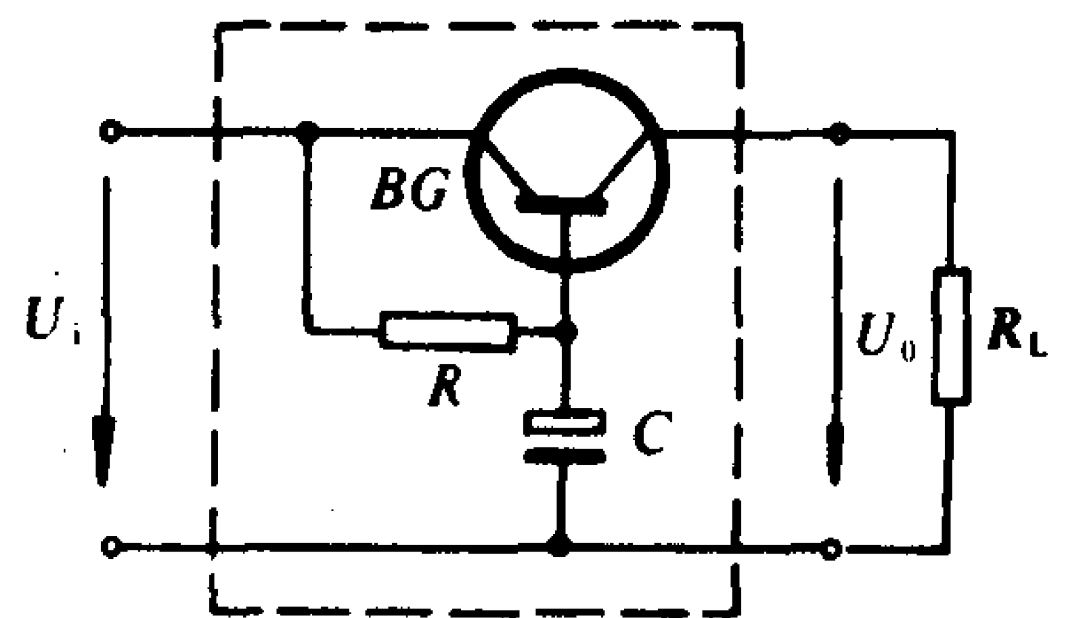


图 1.1.8-134　有源滤波电路

表 1.1.8-37

	Γ型滤波		π型滤波	
电路原理图	L, U_i, C, R_L	R, U_i, C, R_L	L, U_i, C_1, C_2, R_L	R, U_i, C_1, C_2, R_L
电路参数选择	①$LC=\frac{0.471}{4\omega^2 r}=\frac{1.19}{r}$ ②$L=\frac{R_L}{3\omega}$亨 R_L是负载电阻上限值，L常取几百毫亨到几亨范围内。 ③$C=\frac{1.19}{r \cdot L}$(微法)	①R值为几十到几百欧 ②电容值选取与电容滤波一样。	①此电路实际上是由电容滤波C_1及电感Γ型滤波L、C_2组成。所以参数选择与上述滤波电路相同。 ②考虑到合上电源瞬间C_1端电压不能突变，引起冲击电流，所以C_1值要比C_2小一些。	C_1、C_2、R的选取与电容滤和电阻T型滤波电路相同，但C_1值要选得比C_2值小一些
特　　点	①由于流过电感的电流不能突变所以在接通电源瞬间，没有冲击电流。 ②外特性较电容滤波好 ③几乎没直流电压损失	①与电感Γ型滤波比较，采用电阻代替铁心电感，重量轻，体积小，简单经济。 ②带负载能力差 ③有直流电压损失，外特性较差	实际上是由电容滤波和电感Γ型滤波合成的两级滤波器，所以滤波效果好。	为了减小体积减轻重量，用电阻代替电感，在电阻上有一定的直流电压降，使滤波效果稍差一些。

10.4 稳压电路

能自动保持负载两端电压不变的电路称为稳压电路。直流稳压电路常用的有：稳压管稳压电路及调整元件与负载串联的串联型稳压电路。

10.4.1 稳压管稳压电路

1)图 1.1.8-135 为稳压管稳压电路，图中D_z是稳压管，它与负载电阻R_L并联，R是限流电阻。稳压管工作在击穿区，当与之并联的负载两端电压有微小变化时，将引起稳压管电流I_z较大的变化，通过限流电阻R起电压调整的作用，以保持输出电压基本稳定。

2)元件选择　如果输出直流电压V_o和电流I_o为给定值，我们可以按下述方法确定稳定管的稳定电压值U_z和稳定电流I_z。

(1)取稳压管稳定电压$U_z=U_o$(负载端电压)

(2)取稳压管稳定电流$I_z=I_o$(负载电流)

(3)稳压管最大稳定电流$I_{zmax}=(2\sim3)I_o$

(4)稳压电路的输入电压$U_i=(2\sim3)U_o$

(5)限流电阻R可按下式取值

$$\frac{U_{imax}-U_o}{I_{zmax}}<R<\frac{U_{imin}-U_o}{I_{zmin}+I_o}\quad \Omega$$

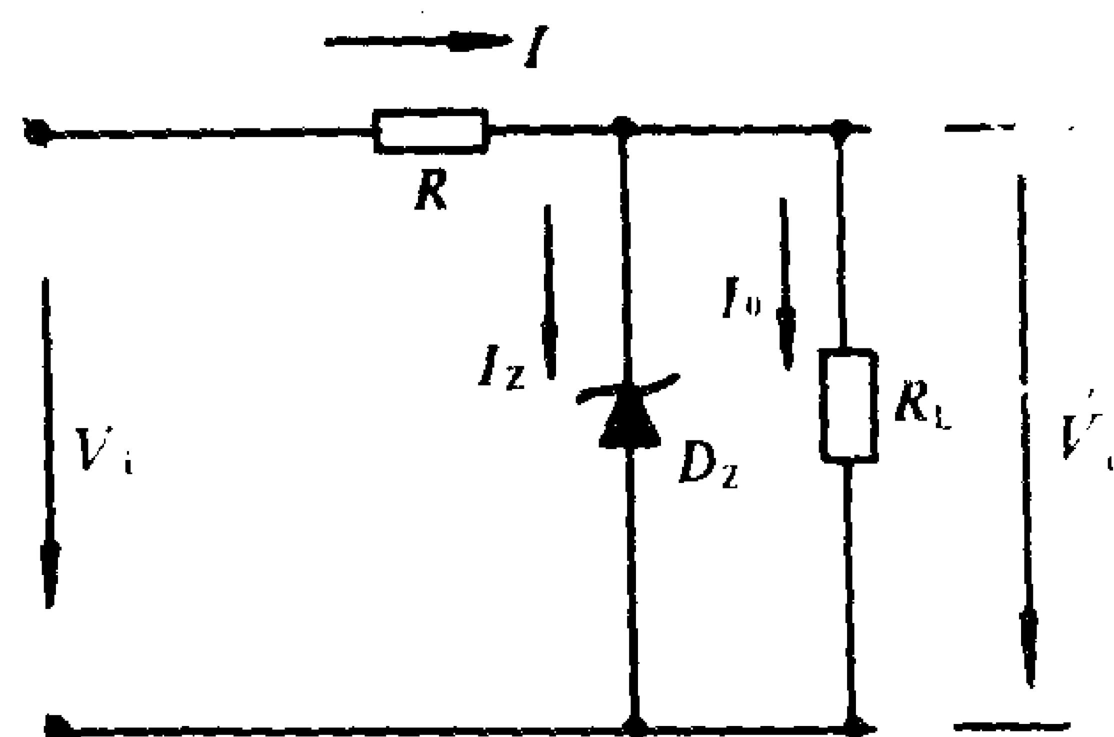


图 1.1.8-135　稳压管稳压电路

(6)限流电阻R的额定功率：

$$P\geq(2\sim3)I^2\cdot R=(2\sim3)\frac{(U_{imax}-U_o)^2}{R}\quad \text{W}$$

式中：U_{imax}——输入电压上升到最大值。一般取U_i上升10%；即+10%；

U_{imin}——输入电压下降到最小值。一般取U_i下降10%，即−10%；

U_o、I_o——分别为负载两端直流电压和电流；

I_{zmax}、I_{zmin}——稳压管最大、最小稳定电流。

10.4.2 串联型稳压电路

1)简单的串联型稳压电路 图1.1.8-136为简单的串联型稳压电路。图中晶体管T相当于一个可变电阻，起电压调整作用，称调整管，其工作原理是：当U_i增加(或负载电流减小)而使V_o增大时，晶体管T的V_{be}减小，I_b减小，I_c减小，V_{ce}增大，使输出电压V_o基本保持不变。

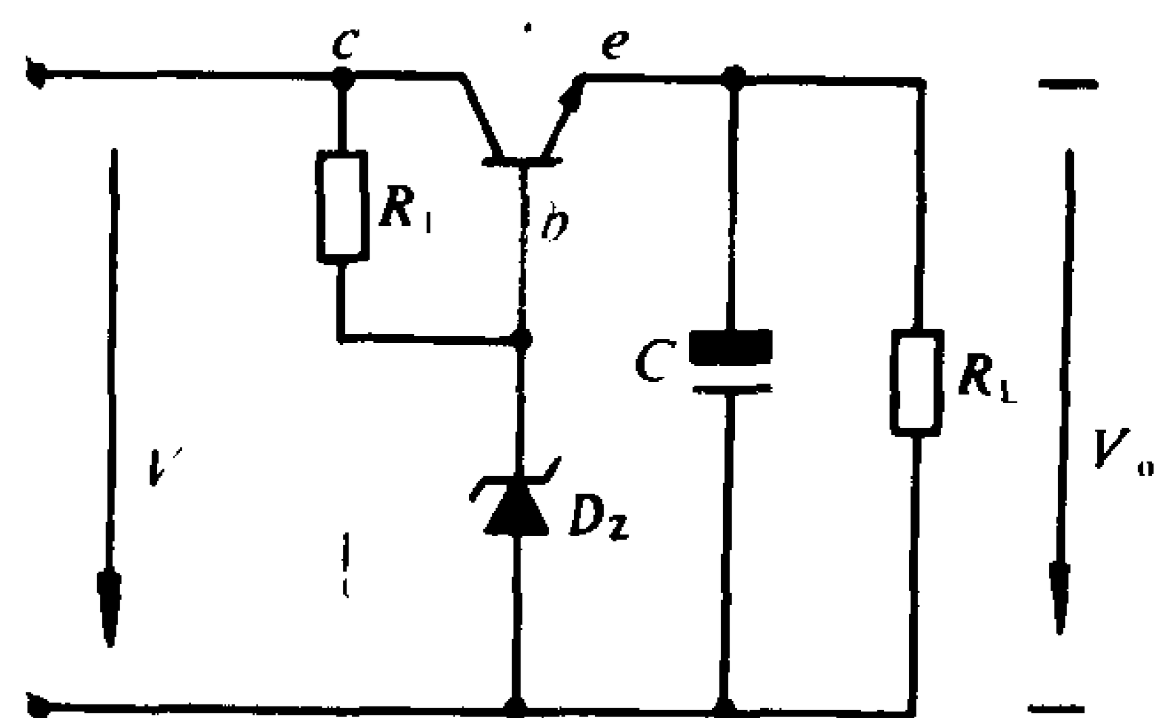


图1.1.8-136 简单串联式稳压电路

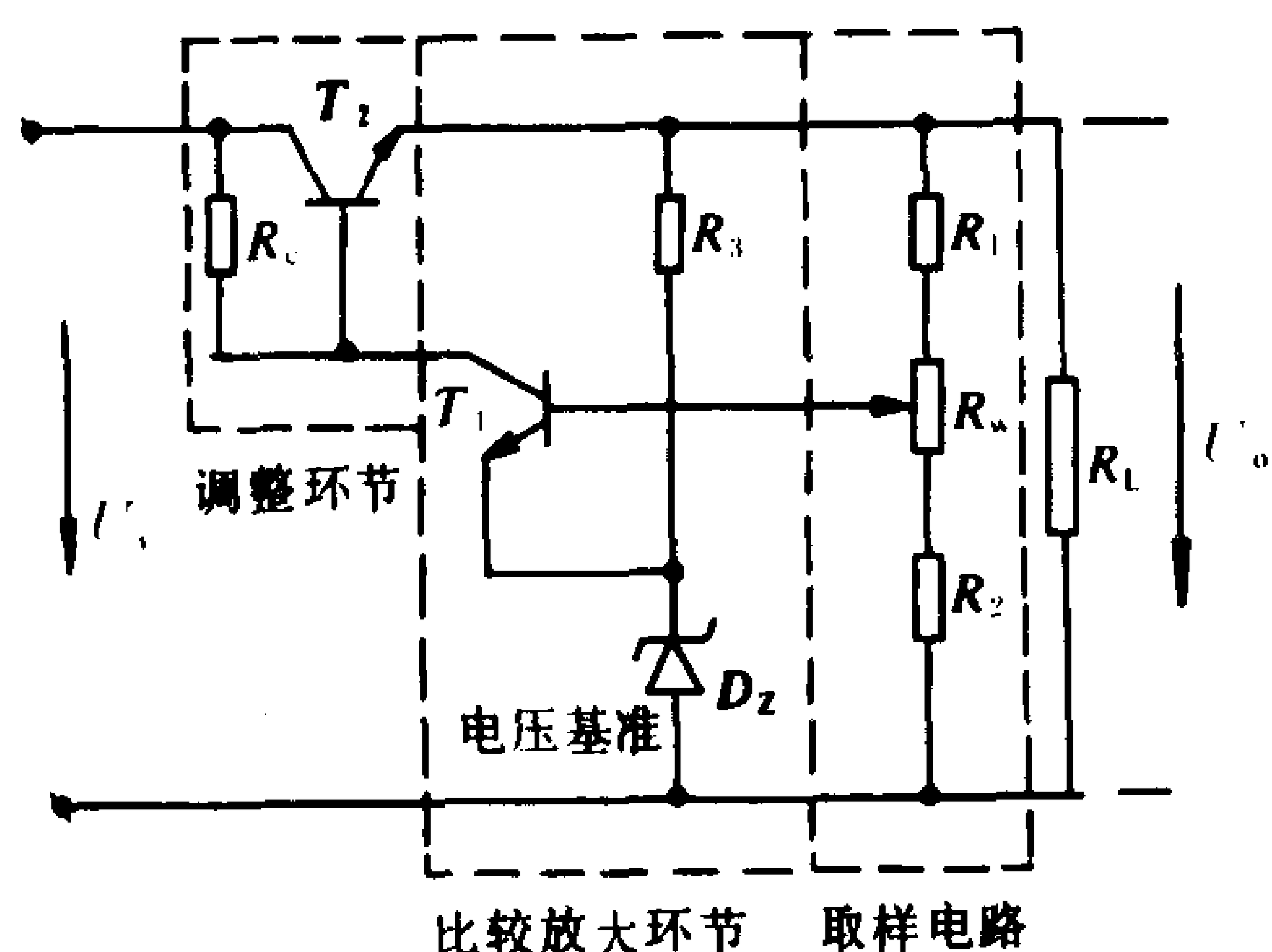


图1.1.8-137 带放大器的串联反馈式稳压电路

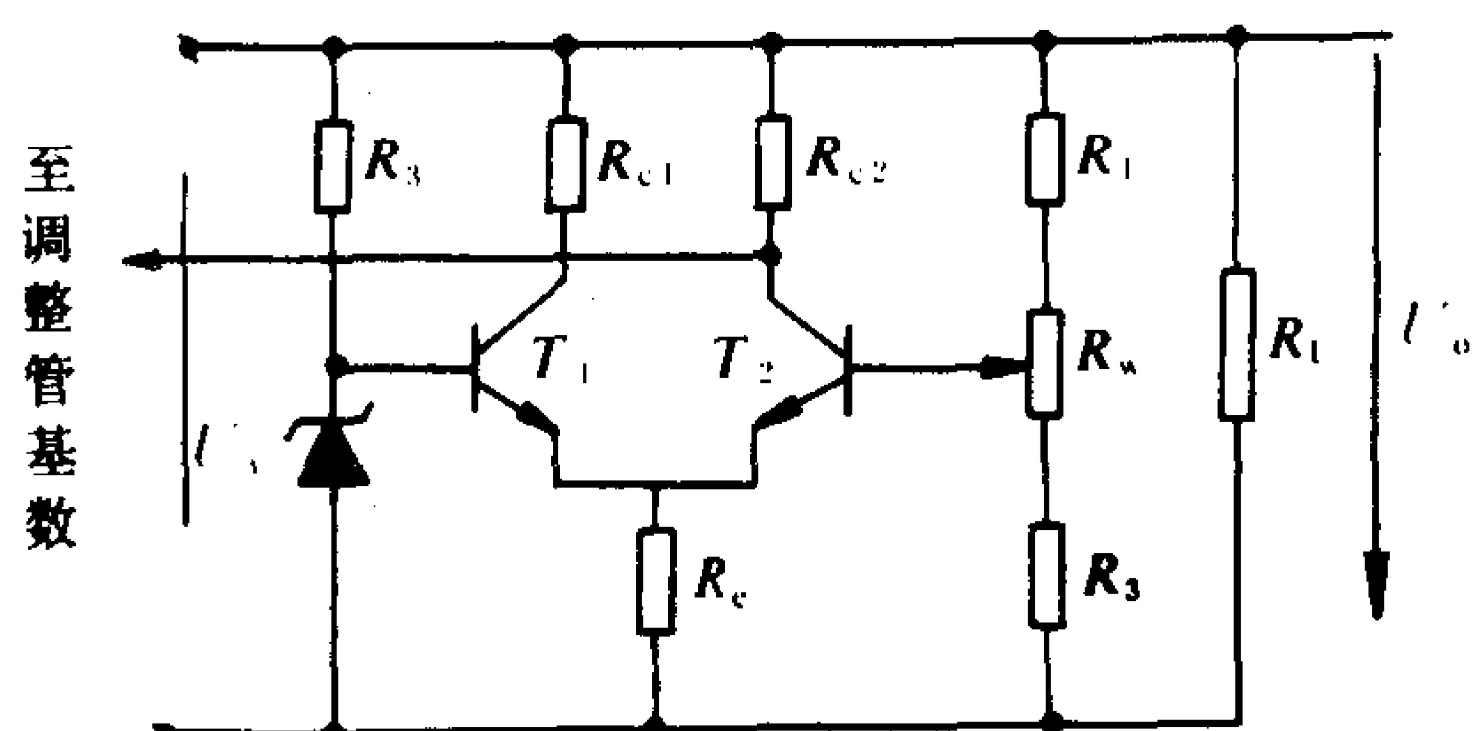


图1.1.8-138 放大环节采用差动放大电路

2)带放大器的串联反馈式稳压电路 图1.1.8-137为带放大器的串联反馈式稳压电路。该电路的特点是：输出电压U_o的波动量ΔU_o经与基准电压的比较和T_1晶体管放大后加到调整管T_2的基极，使调整的作用更加灵敏，输出电压的稳定性更好。

对要求高的稳压电源，为了消除温度变化产生的影响，放大环节可采用差动放大电路，如图1.1.8-138所示。

3)具有辅助电源的稳压电路 图1.1.8-139为具有辅助电源的稳压电路，该电路将放大管的集电极电阻接在辅助电源上，可避免输入电压的突然跳变直接加到调整基极。经放大后出现在输出端。

4)稳压电源的安全措施——过流保护 串联型晶体管稳压电源中调整管和负载相串联，全部负载电流流过调整管，因此在使用过程如果不慎，使输出短路或过流时，调整管将流过很大电流，而且全部整流电压都加在调整管$c—e$之间，致使管子损坏，所以必须有过流保护环节。目前，常用的过流保护电路有限流保护和截流保护两种。

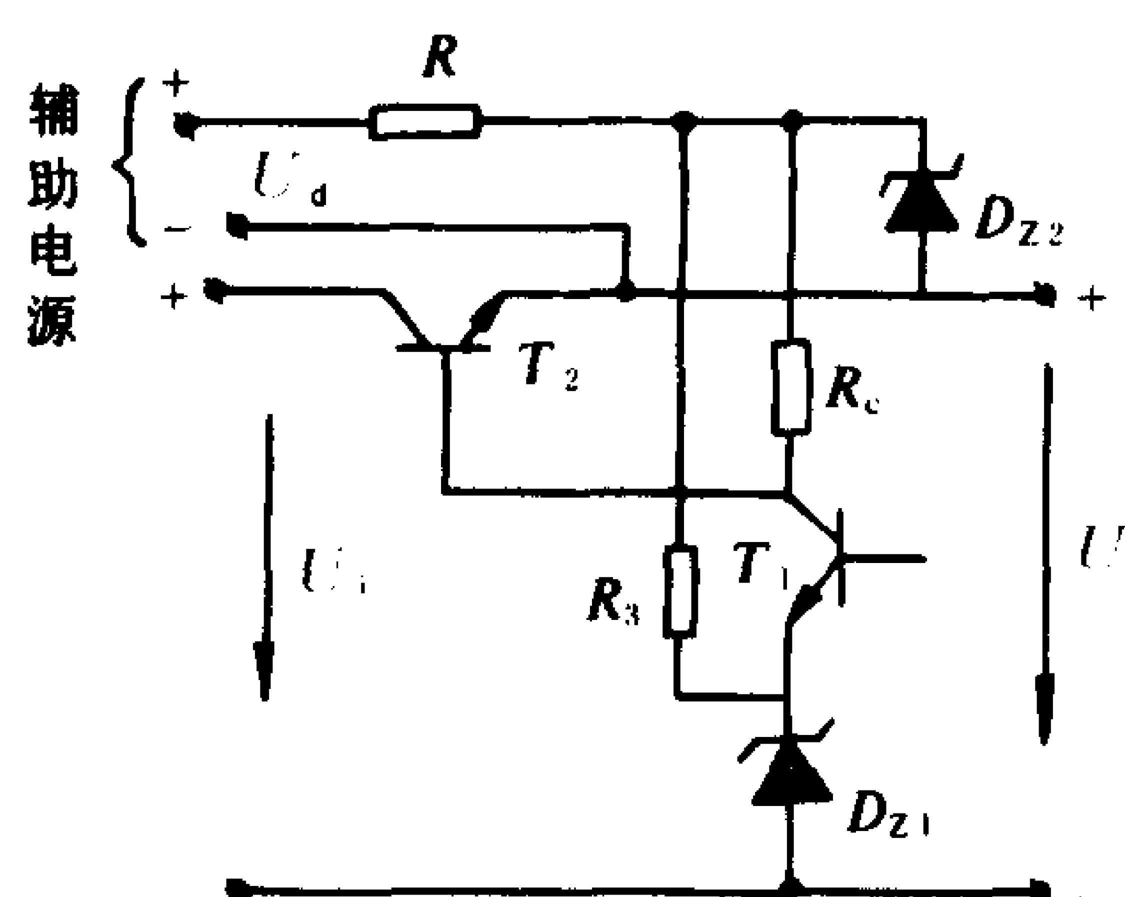


图1.1.8-139 具有辅助电源的稳压电路

限流保护环节具有图1.1.8-140 a)的特性，当负载电

流超过某一定值I_{om}时，输出电压下降，从而将电流限制在一定范围内。采用这种类型的保护电路时，调整管的最大功率要按保护状态下的功率考虑。

截流保护电路具有图1.1.8-140 b)的特性，如果负载电流超过一定值I_{om}时，电路切断，$U_o=0$，$I_o=1$。截流保护分为两种情况：一种是不能自动恢复好，其特性如曲线a)，复位时要按上按钮才能正常工作；另一种是可以自动恢复的，当负载回到额定值以下时，电源自动恢复正常工作，特性如曲线b)。

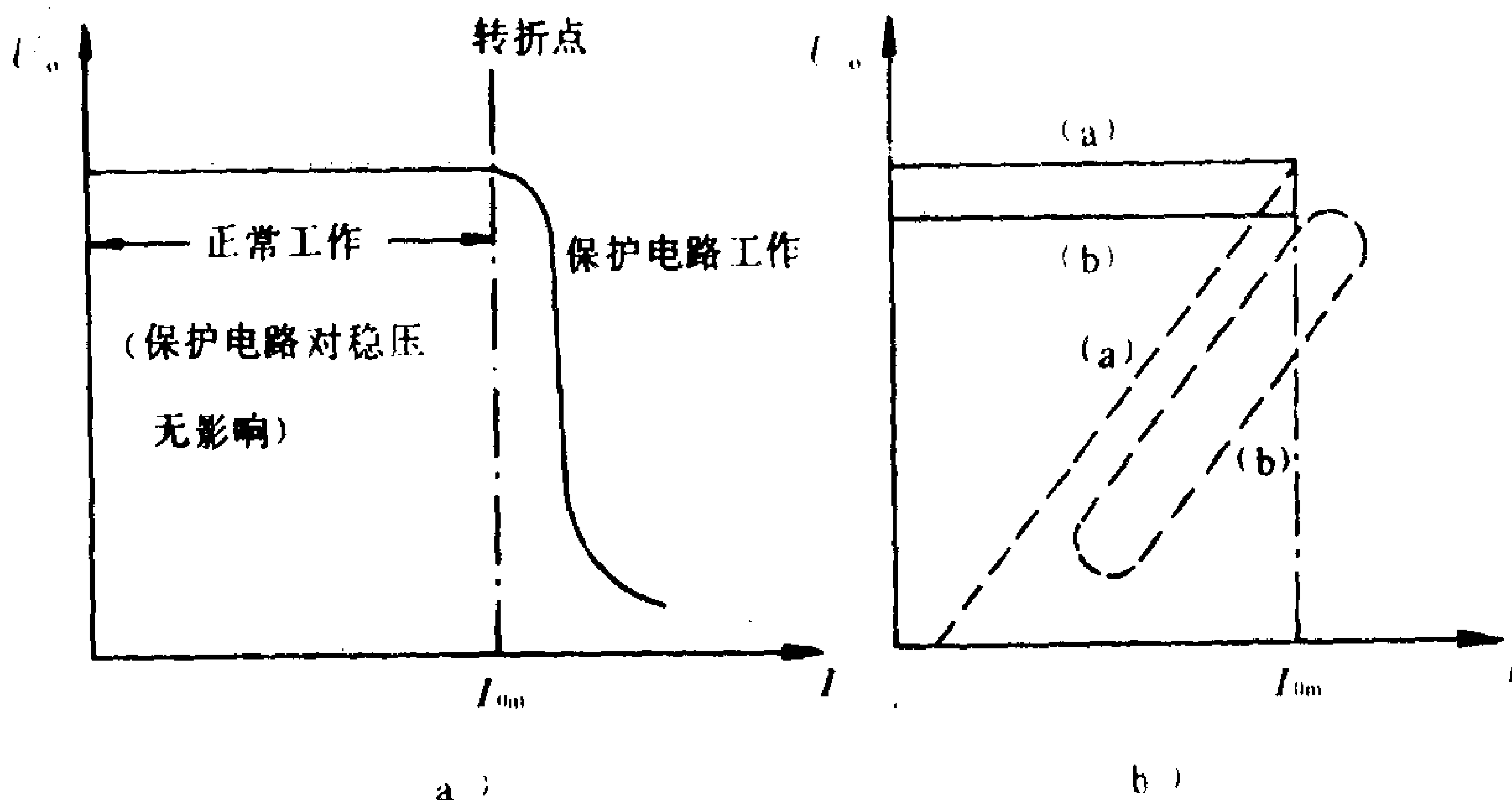


图 1.1.8-140 过流保护特性

a)限流保护特性曲线；b)截流保护特性曲线

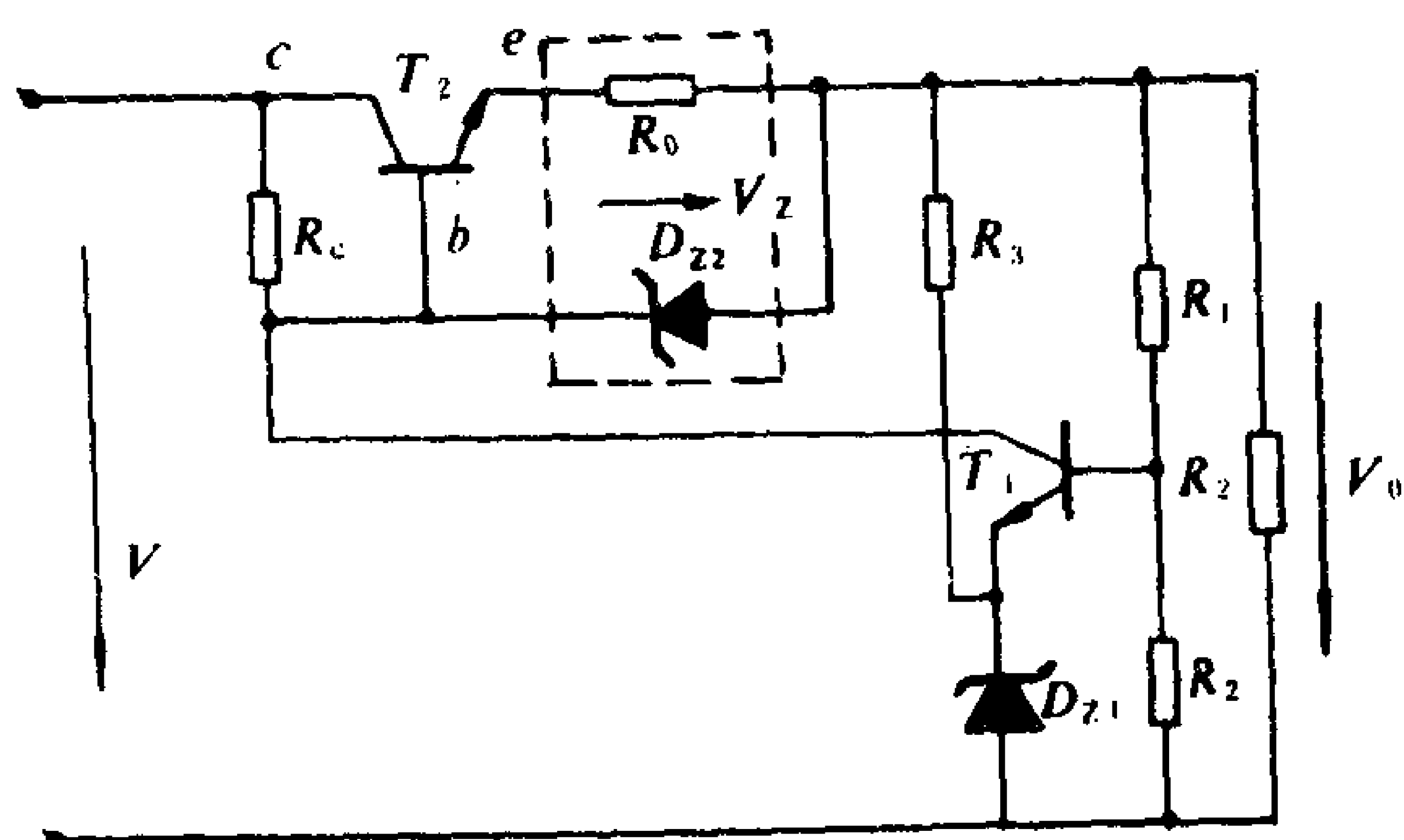


图 1.1.8-141 限流式保护电路

（1）限流保护电路 图1.1.8-141为限流保护电路。它是由稳压管D_{Z2}和电阻R_0构成、正常情况，流过R_0的电流产生的电压小于D_{Z2}的击穿电压，保护电路不起作用，当过载时，R_0上的压降增大，D_{Z2}被击穿，流过R_c的电流立即增加，b点电位下降，使调整管电流减少，因此输出电流I_o减小，把电流限制在一定范围以内，过载或短路时，保护电路有以下关系：

$$I_{omax}\cdot R_0+V_{be_2}=V_{Z_2} \tag{1.1.8-61}$$

如果要求将输出电流I_o限制在I_{omax}值以内，则R_0可近似选择为：

$R_0=\dfrac{V_{Z_2}-V_{be_2}}{I_{0max}}$。

（2）截流保护电路 如图1.1.8-142所示，T_4、R_7、R_8、R_{10}、R_{11}组成截流保护电路。当负载电流I_0比较小时，串联在主回路中的检测电阻R_0上的电压降低，T_4管的发射结反偏，T_4管处于截止状态，对稳压电路的工作没有什么影响。当负载电流超过一定数值时，电阻R_0上的电压降增大，使T_4管导通，$V_{c4}=V_{b2}$的绝对值减小，使调整管趋于截止，使输出电压$V_0\approx0$（接近于地），从而达到保护

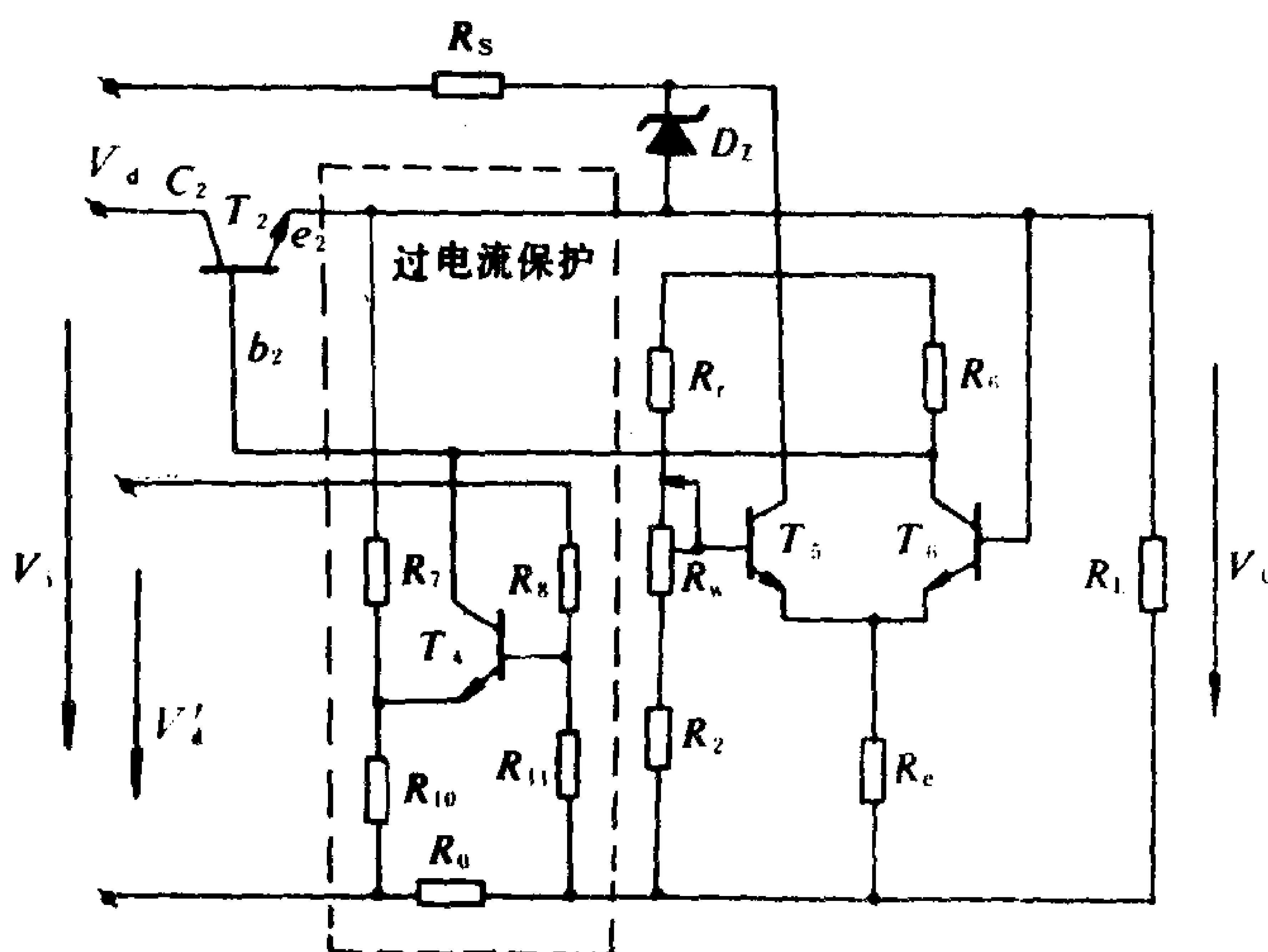


图 1.1.8-142 截流保护电路

的目的。

保护电路的参数可以按以下原则来选择：T_4管为一般的小功率管，经常处于截止状态，为了减少T_4对电源稳定度的影响，要选I_{ceo}小的管子；电阻R_0一般取得较小，使它的压降$I_0R_0=1\ V$左右，足以控制T_4即可；电阻R_7、R_8、R_{10}、R_{11}的选择要保证T_4在正常工作情况下处于截止状态，在过流时T_4管子是导通，而故障排除后又能自动恢复。

实际的串联型晶体管稳压电路形式繁多，但基本结构是相似的，从以上所举的例子中不难看出，其电路一般都由调整元件、比较放大、基准电压，取样电路和保护电路等几个基本部分组成。当负载电流大时，可采用复合管来作调整管。

参考文献

〔1〕康华光：电子技术基础，高等教育出版社，1983.10.

〔2〕童诗白：模拟电子技术基础，人民教育出版社，1982.12

〔3〕阎石：数子电子技术基础，高等教育出版社，1986，2.

〔4〕秦曾煌：电工学(中册)，高等教育出版社，1986.2.

〔5〕〔美〕乔治·弗林编，张鹏译，晶体管一晶体管逻辑电路，人民邮电出版社，1979.2.

〔6〕〔日〕高桥健二编著，赵长奎等译，实用晶体管电路设计，国防工业出版社，1972.

〔7〕机械工程一电机工程手册编委会：电机工程手册（第七卷），机械工业出版社，1982.3.

〔8〕日本电气学会：电工技术手册（第一卷，第4、5篇），机械工业出版社，1984.8.

〔9〕上海航道局：船舶电工手册（下册），上海人民出版社，1975.11.

〔10〕JACOB MILIMAN: ELECTRONIC FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS: FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS, Mcgraw-Hill Book Company, 1976.

〔11〕John D. Ryder: ELECTRONIC FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, Integrated and Discrete Systems prentice-Hill Inc. Eaglewood Cliffs, New Jersey 1976.

第9章　声学和光学

声学是研究声波的产生、传播、接收及其与物质相互作用的科学。

1　一般声学术语的基本概念

1.1　声波

机械振动在弹性介质中的传播过程称声波。声波传播的空间叫声场。

弹性介质中质点振动的方向与声波的传播方向相平行的波，称为纵波。质点振动的方向与声波传播方向相垂直的波，称为横波。

1.2　声波的传播、声速

由于气体和液体仅有体积弹性，所以声波只能以纵波形式在气体和液体中传播。固体不仅有体积弹性，而且还有伸长、弯曲或扭转等弹性，因此在固体中声波既能以纵波形式传播，也能以横波形式传播。

声速（C）是指声波在弹性介质中的传播速度，声速等于声波的频率乘波长，即$C=f\lambda$，单位为m/s。声速与介质的密度、温度和形状等有关。在晶体中，声速还和声波的传播方向有关。

1.3　可听声、次声、超声、声谱

可听声是引起人耳听觉的声波。可听声的频率范围大致为20Hz至20 kHz。人们可借助可听声来进行语言和文化的交流等；还可探测上空气象条件的分布和变化。

低于可听声频率范围的声波，叫次声。次声可用于探测气象变化、核爆炸，预报地震、海啸、风暴、极光，监视火箭、导弹、宇宙飞船的发射及起飞等。高于可听声频率范围的声波，称超声。超声可应用于材料、机械部件的探伤、加工、焊接、清洗以及医疗诊断等。人耳觉察不出次声和超声。次声、可听声、超声等以频率高低可用声谱表示，见图1.1.9-1。

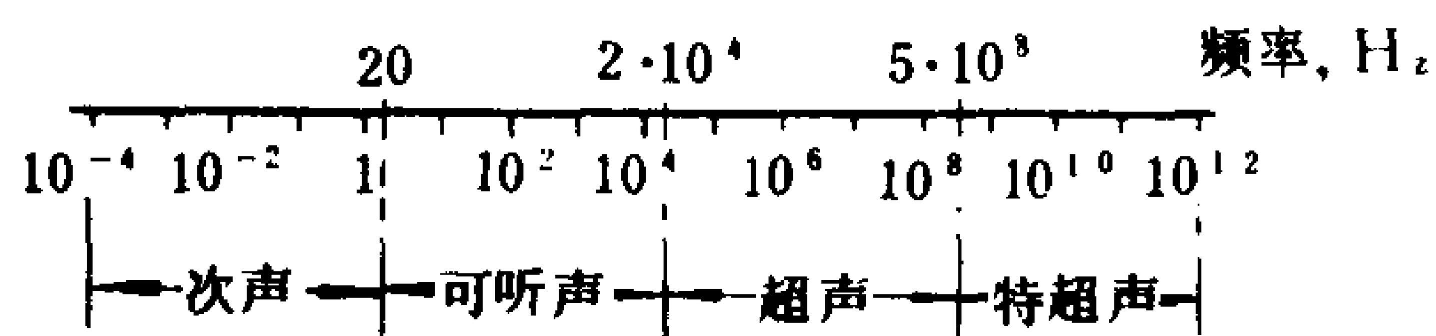


图1.1.9-1　声谱

1.4　声压、基准声压、声压级

声压（p）是描述声场的基本物理量。声压是介质中某一点的压强在某时刻由于声波存在而产生的变化量。这一变化量等于介质中存在声波时压强与无声波时该点的静压强的差值。声压的单位是Pa。在某一时间间隔中最大的瞬时声压，称为峰值声压。在一定的时间间隔内的瞬时声压的均方根值，称为有效声压。这段时间间隔应为周期的整数倍或长到不影响计算结果的程度。一般仪器测得的声压，通常是有效声压，所以习惯上称的声压常常指有效声压。

以分贝表示声压时，基准声压p_0必须指明。基准声压值有两种：1）取接近正常人耳刚能听到1 kHz声波存在的声压值作基准，其数值为$2\times10^{-5}N/m^2$，一般用于测量空气和液体中

声波以及噪声的声压值作基准；2)取 0.1N/m²，用于换能器的校正与测量某些液体中的声压作基准。这两种基准相差 74dB。

声压级(L_p)就是待测声压与基准声压的比值取以 10 为底的常用对数后，乘以 20，以分贝 dB 表示，即

$$L_p = 20\ \lg\frac{p}{p_0}\text{dB} \qquad (1.1.9\text{-}1)$$

1.5 声强、基准声强、声强级

声强(I)是在声波传播方向上单位时间内垂直通过单位面积的声能量，以W/m²表示。引起人耳听觉的声波，不仅要求有一定的频率范围，而且还要有一定的声强范围，通常约为10^{-12}W/m²~1W/m²。由于声强的变化范围很大，因此，声学中常用声强级来描述声波在介质中各点的声强强弱。

声强级(L_I)就是待测声强(I)与基准声强(I_0)的比值取以 10 为底的对数后，乘以 10，以dB为单位，即

$$L_I = 10\ \lg\frac{I}{I_0}\text{dB} \qquad (1.1.9\text{-}2)$$

以dB表示声强时，基准声强必须指明。常用基准声强取频率为 1 kHz 的声波能够引起听觉的最弱的声强，其数值为10^{-12}W/m²(1PW/m²)。在空气中的自由行波中，由于所选基准适当，声强级等于声压级。但在一般情况下，两者的关系复杂，无法用声压级求声强级。

1.6 声功率、基准声功率、声功率级

声功率(Pa)是指单位时间内垂直通过指定面积的声能量，以 $\overline{W}$ 表示。

基准声功率(Pa)取频率 1 kHz 的声波能够引起听觉的最低声功率，其数值一般为 10^{-12} $\overline{W}$(1PW)。

声功率级(L_{Pa})就是待测声功率与基准声功率的比值取以 10 为底的对数后，再乘以 10，以dB为单位，即

$$L_{Pa} = 10\ \lg\frac{P_a}{P_{ao}}\text{dB} \qquad (1.1.9\text{-}3)$$

基准声功率必须指明。

1.7 声波的反射、折射、吸收

当声波从介质 1 传播到介质 2 时，在分界面上，一部分声能反射返回介质 1，这种现象称为反射现象。其余的声能中有一部分穿过介面在介质 2 内继续传播，但传播方向有所改变，称为折射现象。还有另一部分则被介质 2 吸收，转化为热，这叫做声吸收。

1.8 反射系数、传声系数、吸声系数

反射系数（β）等于被反射声能(E_r)与入射声能(E_i)的比值，即$\beta = E_r/E_i$。

传声系数（τ）等于透过界面在第一种界质中继续传播的声能(E_p)与入射声能的比值，即$\tau = E_p/E_i$。

吸声系数（α）是指被吸收的声能（E_a）与入射声能的比值，即$\alpha = E_a/E_i$。

$\beta + \tau + \alpha = 1$，通常$\tau$仅为$\beta$、$\alpha$的几十分之一，可略去不计，因此，$\alpha = 1-\beta = 1-E_r/E_i$。

任何材料都不同程度地吸收声音。吸声系数与材料的物理性质、声音频率及声波射线的入射角有关。一般来说，密度小、孔隙多的材料，其吸声性能较密度大，孔隙少的材料为好；但疏松、稀薄孔隙太大的材料，其吸声性能反而降低。此外，温度、湿度和气流等环境条件，对吸声材料的吸声性能也有影响。

1.9 声波的干涉、衍射、声全息

声波具有波动的一般特征，也能产生干涉，衍射等物理现象。

声波的干涉是指同一介质中一些频率相同的声波相互叠加所产生的现象。干涉的结果使声场中某些点振动加强，某些点振动减弱，形成一固定的分布。常以干涉现象鉴别波动过程。声驻波现象，是由振幅频率相同而传播方向相反的两列平面波在相遇时，声波干涉所形成的振幅的空间分布固定的周期波。驻波的特点是具有固定空间的节或次节和腹。幅值最大处是腹，最小处是节（最小为零）或次节（最小但不为零）。

声波在传播路径上遇到障碍物时，其中部分声波能够绕过障碍物的边缘继续向前传播，这种现象称为声波的衍射。其余声波被障碍物所散乱的现象称为声波的散射。

声全息是利用干涉现象来实现物波全部信息（振幅分布和相位分布等）的记录和重现。声全息应用于无损检测、港口监视、测绘海底地貌和医疗诊断等方面。

1.10 声波的衰减、衰减系数

声波在均匀介质中传播时，其振幅、声强等随声源的距离的增大而减弱，这种现象称为声波的衰减。声波衰减的主要原因是由于介质对声波的吸收和介质中的粒子（流体的悬浮粒子或固体的颗粒结构）对声波的散射。由于声压的距离平方反比定律而降低的一般不算在衰减内。

衰减系数（a）是描述声波传播损失的一个物理量。它同传播的距离有关。

$$a=\frac{1}{x_2-x_1}\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)=\frac{1}{2(x_2-x_1)}\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \qquad (1.1.9\text{-}4)$$

式中：A_1、I_1——分别是 x_1处的振幅与声强；

A_2、I_2——分别是 x_2处的振幅与声强；

a——衰减系数，单位常用奈培/厘米，NP/cm，1NP/cm=868.6dB/m。

1.11 特性阻抗、声阻抗、声阻抗率

特性阻抗(Z_0)是指各向同性的均匀介质中，平面自由声波中一点的有效声压与通过该点的有效质点速度的比值。特性阻抗等于介质的密度与声速的乘积，即$Z_0=PC$，其单位为$N\cdot S/m^3$。

声阻抗（Z_a）是指作用在一定表面上的声压对通过该表面的体积速度的复数之比。其单位为声欧姆，$N\cdot S/m^5$。

声阻抗率（Z_s）是指传声介质中某点的有效声压与质点速度有效值的比值。通常声阻抗率是一个复数。其实部称声阻率，虚部称声抗率。其单位为$N\cdot S/m^3$。

1.12 响度、响度级

响度是一个以正常人耳听觉对声音强弱程度的感觉。它主要取决于声音的强度，也与声

音的频率和声波波形有关。声强相同的声音，其频率在 1～4 kHz（特别是在 3～4 kHz）之间时，对人耳听觉最为敏感。在此范围之外，随着频率的升降，人耳的响度感觉逐渐降低，当低于 20 Hz 或高于 20 kHz 时，人耳便不能引起声感觉。响度的单位为sone（宋）。

响度级等于根据听力正常的听音判断为等响的 1kHz 纯音（来自正前方面的平面行波）的声压级。响度级的单位为 phon（方）。响度级是用人耳听觉来比拟声音的强弱程度的主观单位。它把声音的声压级与频率综合成为单一的物理量，以评价声音的强弱。利用与基准声比较的方法，就可以测出整个可听范围纯音的响度级，并可绘出等响曲线，见图 1.1.9-2。

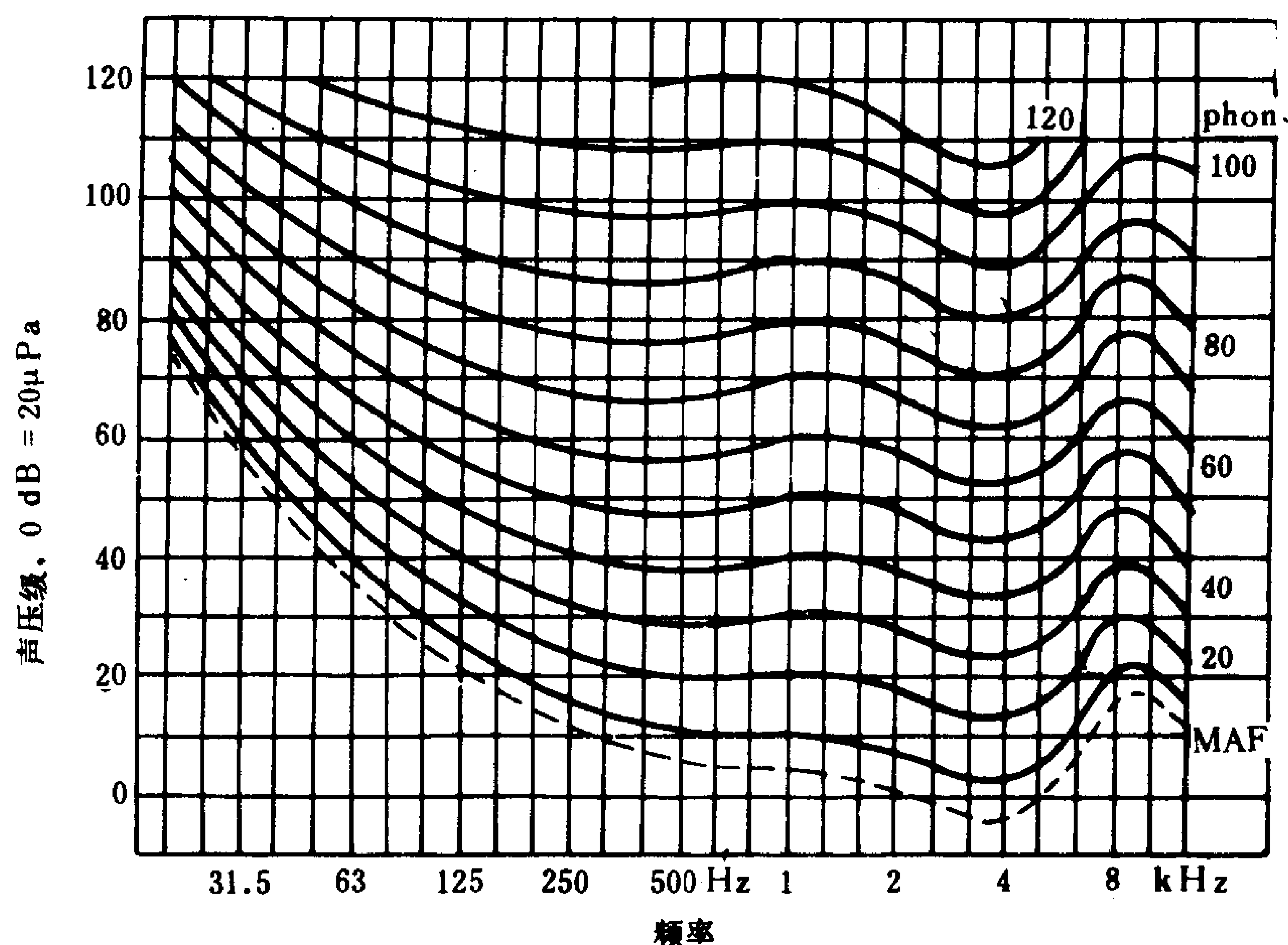


图 1.1.9-2　纯音等响曲线

1.13　噪声、海洋噪声、船舶噪声

噪声是指声强和频率的变化都是无规律、杂乱无章的随机的声音。它给人以烦躁感觉，甚至会影响身心健康和正常的工作。船舶噪声、按传播介质的不同，分为空气噪声、结构噪声和水噪声。按声源的不同，分为机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声三大类。无论是船舶的空气噪声、结构噪声还是水噪声，都是各种声源产生的噪声的合成。各种机器由于它的振动或零部件的运动直接辐射出空气噪声。同时，它的激励力将引起船体结构的振动，即产生结构噪声。螺旋桨转动时，由于空化现象直接产生水噪声（空泡噪声），而空泡破裂时产生冲击波冲击船体，以及螺旋桨击水时的激励，都将引起船舶壳体和结构的振动。又如海浪的拍击，水流与舰船壳体的作用，形成的湍流直接生成水噪声，也同样要激起船体的振动，形成结构噪声。对于这些噪声可以按噪声产生的机理加以分类。例如，可以分为空气动力性噪声、机械噪声和电磁性噪声。螺旋桨噪声可分为空泡噪声和旋转噪声。

海洋噪声是指由于自然原因，如风、雨、波浪、水流、热扰动等在海洋中引起的噪声。

在深海中环境噪声声源为：潮汐和波浪的压力作用。地震扰动、海洋湍流、船舶辐射噪声、水面波浪、热噪声等。浅海噪声出入较大，在港湾内，除了深海声源外，主要是工业生产、船舶航行等人为噪声以及生物噪声。在沿岸和大陆架上，风速仍是主要因素。其它声源最主要的是生物噪声和雨声。

平均深海环境噪声频谱如图 1.1.9-3 所示。

民用船舶因考虑船员的工作条件和旅客的生活环境。主要关心的是舱室空气噪声和结构噪声。船舶上空气噪声大致分为声源舱室噪声和一般舱室噪声两类。声源舱室的噪声由主机、

辅机等噪声声源的性质所决定。一般舱室如驾驶室、无线电室、船员生活舱室等的噪声，既有声源噪声直接传播而来的噪声成分，也有各种管道（特别是通风系统）、船体结构传递以及壁板振动辐射的噪声成分，一般舱室噪声强度比声源舱室噪声强度弱得多，频率成分比较平均，无特征频率成分。船舶上各舱室的噪声强弱与噪声性质因受舱室的性质和尺寸、机器声源的类型与功率以及工作状态、船体结构等因素的影响有很大的不同。船舶噪声的平均声源级，见表1.1.9-1。

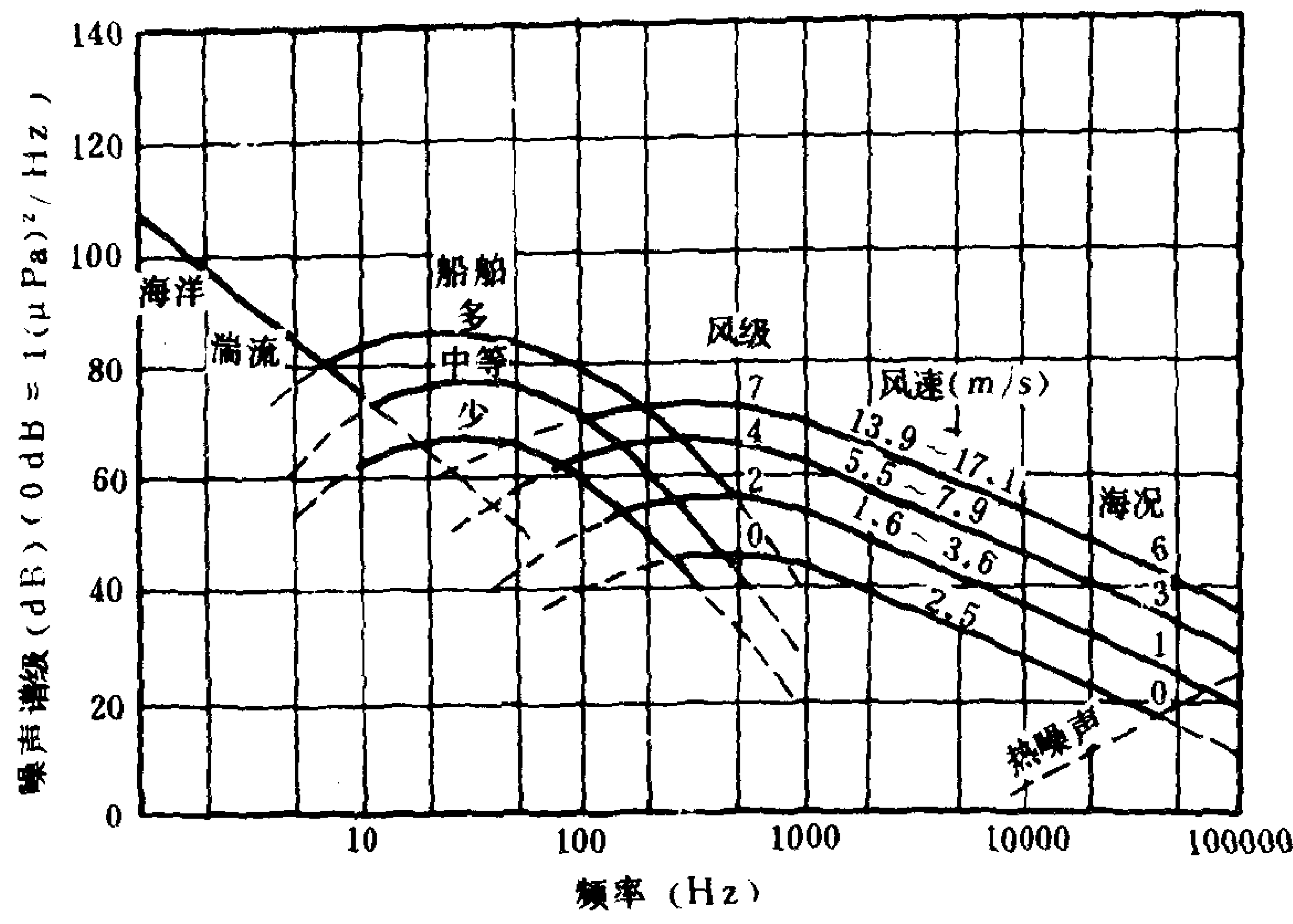


图 1.1.9-3　平均深海环境噪声频谱

表 1.1.9-1　**船舶噪声的平均声源级**

频　率	运输舰 时速 10 kn	客　船 时速 15 kn	战　舰 时速 20 kn	巡洋舰 时速 20 kn	歼击舰 时速 20 kn	猎潜艇 时速 15 kn
100 Hz	133 dB	143 dB	157 dB	150 dB	144 dB	138 dB
300	123	133	147	140	134	128
1 kHz	112	122	136	129	123	117
3	102	112	126	119	113	107
5	98	108	122	115	109	103
10	92	102	116	109	103	97
25	84	94	108	101	95	89

1.14　混响、混响时间、扩散

当声源在室内连续发出一段声音后而突然停止时，由于房间内存在边界面或障碍物，使声波在其间多次反射或散射，于是室内产生了声音延续现象，逐渐由强变弱，直到完全消失。这一现象称为混响。海洋中的混响是由于声呐发出的声能遇到大量散射体而产生的反向散射形成的。

混响时间是指在一围闭空间内，当一频率的声音在声源已被停止后，在此围闭空间内声压级减少 60 dB所需要的时间。房间越大，房间内吸声量越小，混响时间越长；反之则越短。混响时间过长，语言清晰度降低。

扩散是指混响声均匀地向各方向到达听者的状态。

1.15　噪度、感觉噪声级、噪声冲击

与人们主观判断噪声的"吵闹"程度成比例的数值量，称为噪度，噪度的单位为 noy（呐）。

感觉噪声级是描述噪声声压级的主观评价参数，其单位为 PNdB。感觉噪声级与响度级相对应，噪度与响度相对应。感觉噪声级同噪度的换算关系与响度级同响度的换算关系相同。其不同之处在于前者是以复合音为基础，而后者是以纯音为基础的。

噪声冲击是指噪声对人类生活和社会环境的短期或长期的影响，可用总计权人数 TWP 描述

$$TWP=\sum_{i} W_i P_i \tag{1.1.9-5}$$

式中，P_i 为受全年昼夜平均声级某范围（例如 60～65 dB）内冲击的人数，W_i为在该声级范围内的计权因数。

1.16 白噪声、粉红噪声、无规噪声

用固定频带宽度测量时，频谱连续并且均匀的噪声，称为白噪声。

粉红噪声是指用正比于频率的频带宽度测量时，频谱连续并且均匀的噪声。

瞬时值不能预先确定的声振荡，称为无规噪声。无规噪声的瞬时值对时间的分布只服从一定的统计分布规律。无规噪声不一定是白噪声。

1.17 隔声、隔声量

隔声是应用间隔层减低声波在空气中传播的措施。

隔声结构的隔声性能通常用隔声量或传声损失（TL）来表示，其值取决于传声系数（τ），即

$$TL=10\lg\frac{1}{\tau}\text{dB} \tag{1.1.9-6}$$

隔声结构的隔声量（TL）随结构的单位面积质量增加而增加，同时与声音的频率和声波入射方向有关。声波垂直入射薄板时的公式为

$$TL=20\lg m+20\lg f+43\ \text{dB} \tag{1.1.9-7}$$

式中：m——结构单位面积质量，kg/m²；

f——频率，Hz。

选取人们生活中常见的主要频率平均值（500 Hz）作标准，上述经验公式简化为

1）当$m>100\text{kg/m}^3$时，$TL=18\lg m+8$

2）当$m<100\text{kg/m}^3$时，$TL=13.5\lg m+13$

1.18 声呐、声呐自噪声、混响限制情况

声呐是指利用水声测定海水中物体的存在、方向、位置或性质的设备。

声呐接收系统输出中，除有用信号外，因声呐、机器、船或船台的运动而引起的噪声称声呐自噪声。自噪声常用沿最大响应方向到达声呐的等效平面波声压级表示。

混响限制情况是指声呐检测受其背景噪声中的混响声所局限时的情况。

1.19 多普勒效应

当声源、观察者（接收器）和介质之间有相对运动时，观察者测得的声音频率将与声源的发射频率不同，这种现象称多普勒效应。

假若在声源和观察者的连线方向上，观察者以速度u_o运动，声源以u_s运动，介质以速度

u运动，则观察者测得的声音频率为f。

$$f_0=f_s\frac{c+u+u_0}{c+u+u_s} \quad (1.1.9\text{-}8)$$

式中：c——介质中的声速；

f_s——声源的频率。

若有关速度的方向不在声源到观察者的连线方向时，但只要把速度在连线方向上的投影分量代入上式，就可以求出相应的多普勒效应。

1.20 噪声测量、噪声控制

人们可以根据不同的目的和要求，选取合适的测量仪器和测量方法，获得有关噪声的较为准确的资料数据。船舶噪声的测量包括空气噪声、结构噪声和水下噪声的测量。由于这些声场所在的空气、固体、水的介质性质不同，表征这些声场的物理量也就不同。在空气噪声和水下噪声中，声场主要用声压、声强或声功率来表征，而在固体噪声中则用振动位移、振动速度或振动加速度来表征。噪声测量中，应针对测量对象的声场特性，如频率范围，噪声强度 声波性质以及环境条件来选取适合仪器。在船舶的现场测量中，声级计是最常用的仪器。

噪声对周围环境的污染，大致可以分为三个阶段：噪声源→中间传播途径→接收者。为了控制噪声，应该根据具体情况在上述三个阶段中采取措施。

降低声源噪声是控制噪声最根本、最直接和最有效的措施。在声源处即使只是局部地减弱了噪声，也可使在中间传播途中或接收控制噪声的工作大大简化。

如果受具体条件限制，无法降低声源噪声时，那么需要在噪声传播的途径采取控制措施。首先在总体设计时对强噪声源的位置进行合理布局，以便于采取局部隔离等措施。其次，改变噪声传播的方向或途径，在噪声传播的途径中直接采取吸声、隔声、隔振和减振等常用的噪声控制技术。

在某些情况下，噪声特别强烈，采用上述措施后，噪声级仍不能降低到容许标准以下。或者工作过程中，工作人员需要进入强噪声环境中，为保证工作人员的健康，要采用个人防护的措施。如在耳内塞防声棉、耳塞，佩带耳罩、头盔等隔声防护工具，使强烈的噪声不致进入耳内而造成危害。在噪声强烈的地方采取隔声防护等，让工作人员在隔声室内工作，也是切实可行的个人防护措施。

1.21 频程、频谱、谱级

可听声的频率从 20～20000 Hz，其变化范围很宽，为了便于分析和简化测量，把声频范围分为几个频程或频带。频程分得越细，对噪声分析的精度越高。在噪声测量中，最常用的是倍频程和$\frac{1}{3}$倍频程。倍频程是上下两个频率之比为 2：1 的频程，如某倍频程的中心频率为f_m，其上下频率分别为f_u，f_e，则

$$f_m=\sqrt{f_u f_e} \quad \text{Hz} \quad (1.1.9\text{-}9)$$

$$f_u=2f_e \quad \text{Hz} \quad (1.1.9\text{-}10)$$

目前常用的倍频程中心频率为 31.5、63、125、250、1000、2000、4000、8000、16000 Hz。这 10 个频程可以把可听声全部表示出来，大大简化了测量。实际上在噪声控制的现场测试中，

往往只用 63～8000 Hz 8 个倍频程，它所包括的频段如表 1.1.9-2 所示。

表 1.1.9-2　**倍频程频率范围（IEC）**

中心频率Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
频率范围Hz	45～90	90～180	180～350	350～710	710～1400	1400～2800	2800～5600	5600～11200

噪声分析中采用⅓倍频程，是把一个倍频程再分 3 份，其中心频率和每一个中心频率的范围见表 1.1.9-3。

表 1.1.9-3　**⅓倍频程中心频率与频率范围（IEC）**

中心频率Hz	频率范围Hz	中心频率Hz	频率范围Hz
50	45～56	1000	900～1120
63	56～71	1250	1120～1400
80	71～90	1600	1400～1800
100	90～112	2000	1800～2240
125	112～140	2500	2240～2800
160	140～180	3150	2800～3550
200	180～224	4000	3550～4500
250	224～280	5000	4500～5600
316	280～355	6300	5600～7100
400	355～450	8000	7100～9000
500	450～560	10000	9000～11200
630	560～710	12500	11200～14000
800	710～900		

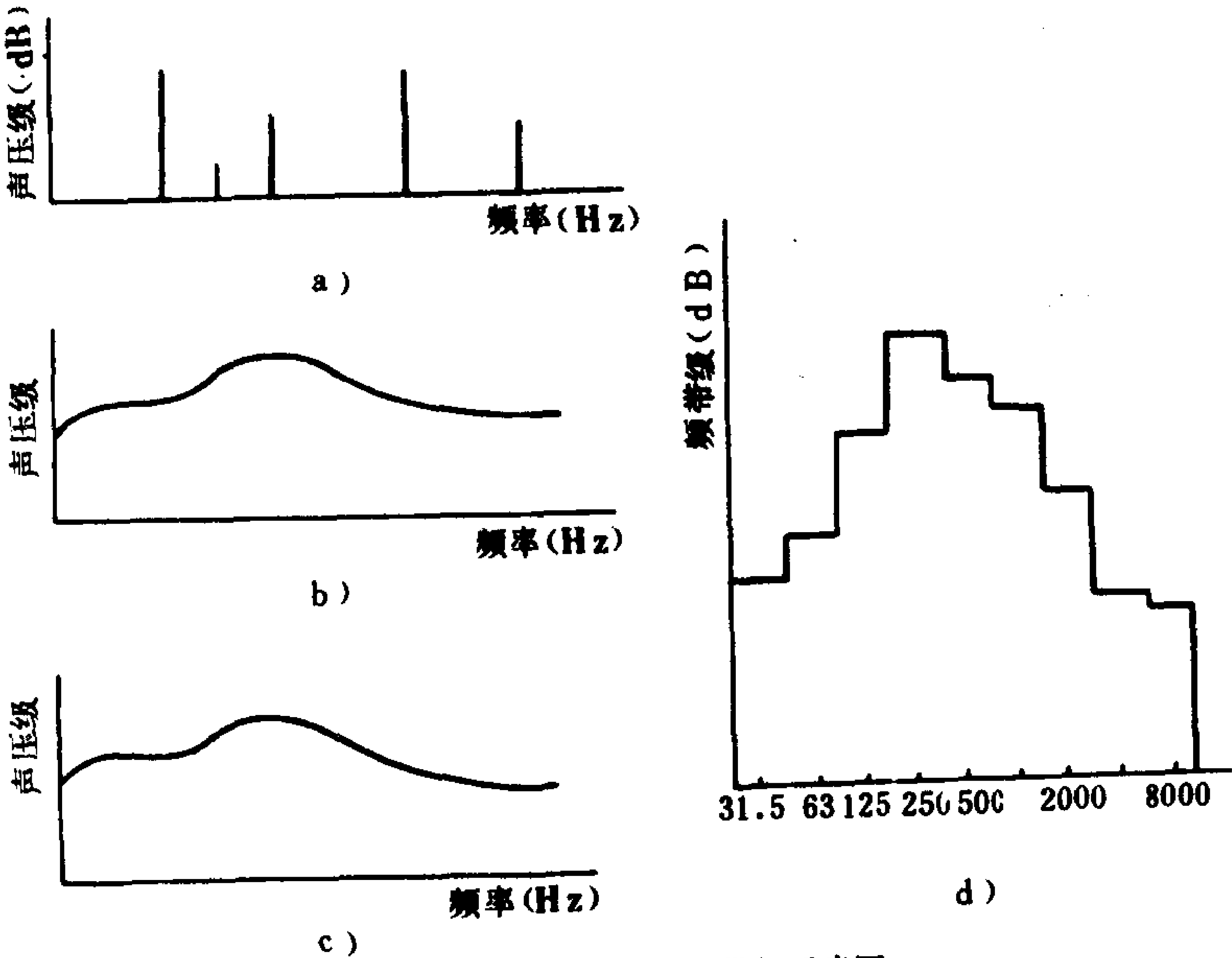


图 1.1.9-4　频谱与谱带级示意图

a)线状谱；b)连续谱；c)复合谱；d)频带级谱图

通常把噪声各频率分量的声压幅值与对应频率的关系称为频谱，并绘制频谱图来表示。根据噪声的性质，这种频谱可分为线（状）谱和连续谱。线谱是由频率分立的一些分波所组成的谱，而连续谱是由频率在一定范围内是连续的分波所组成的谱。船舶噪声通常是这两种频谱的总和，即线谱与连续谱的叠加，如图 1.1.9-4 所示。

在噪声控制中，通常没必要知道每一频率上的噪声分量，而是测量各频程上的声压级，得出以对应频带（以中心频率代表）为变量的频带级谱图，如图 1.1.9-4 d）所示。

1.22　噪声容许标准

噪声对人的影响，不但取决于噪声的声压、声强、频率等物理量，而且还与人的心理，生理以及社会生活等方面的因素有关。噪声的强度越大，频率越高，对人的作用时间越长，

则危害性越大。

国际标准化组织（ISO）1961 年建议，每天工作 8 小时，以噪声评价曲线（图 1.1.9-5）中NR 85 作为噪声容许标准。

1967 年，国际标准化组织又提出用A声级作为噪声评价ISO新标准。A声级和噪声评价数 NR 之间的换算关系为

$$A\text{声级} = \mathrm{NR} + 5\mathrm{dB} \qquad (1.1.9\text{-}11)$$

工作时间减半，则容许噪声可提高 3 dB（A）。

对于幅度随时间变化很大的噪声，可以用统计分布来描述。对于大部分噪声，其幅值随时间变化的分布近似于高斯分布。这种噪声的大小可以用等效连续噪声级（平均声级）L_{eff} 表述。它是在时间T过程中噪声的A声级按能量平均，其公式为

$$L_{eff} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\int_0^T 10^{0.1L}\mathrm{d}t\right) \qquad (1.1.9\text{-}12)$$

式中：L_{eff}——等效连续A声级，dB；

L——变化声级的瞬时值，dB。

ISO 组织又提出：在一般情况下，L_{eff} 等于 85～90 dB（A）为保护听力的噪声容许标准。住宅区室外噪声容许标准为 35～45 dB(A)。

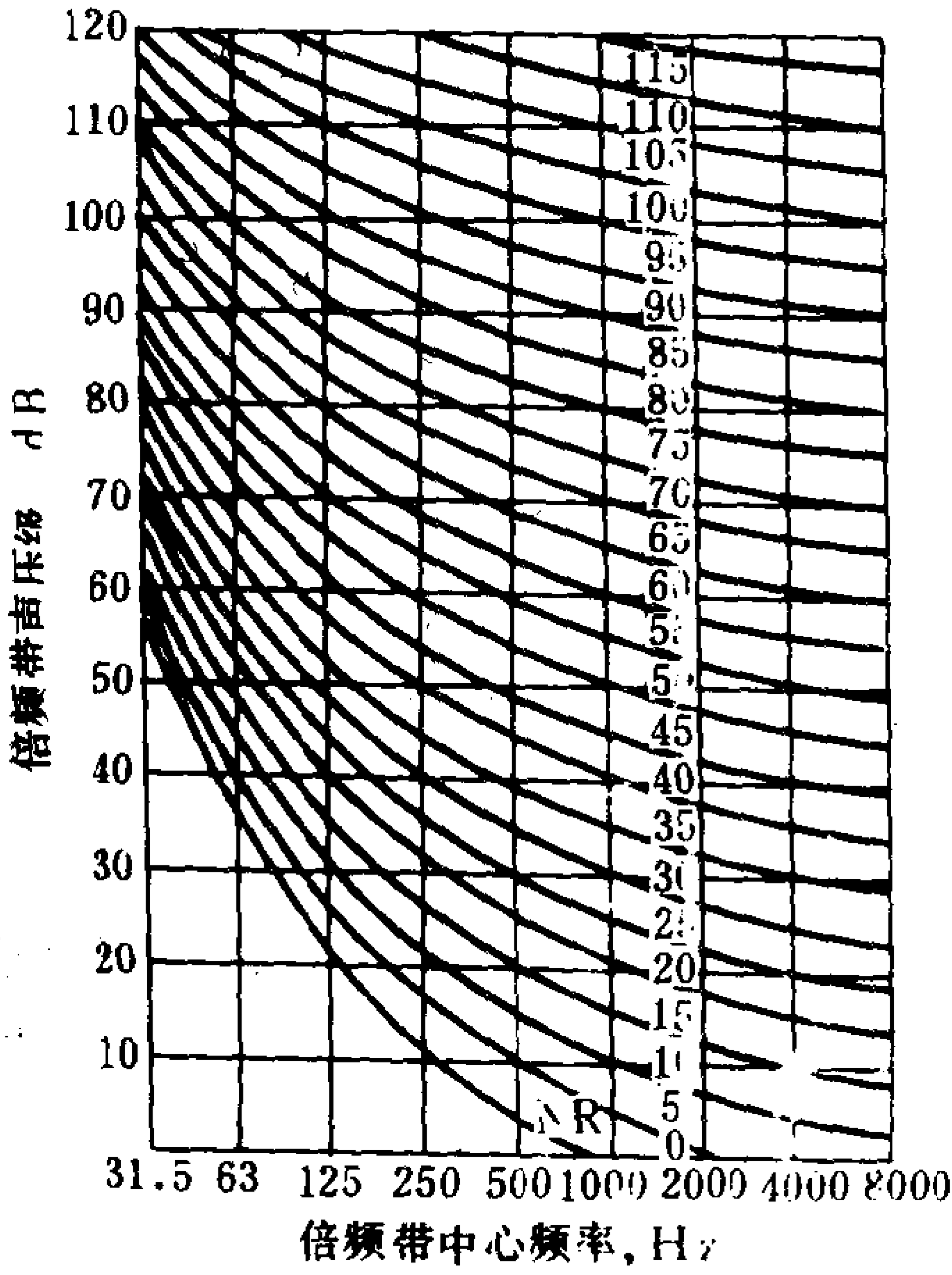


图 1.1.9-5 噪声评价数（ISO-1961）

2 声学常用公式和资料

2.1 声速

在气体中

$$C = \sqrt{\gamma P/\rho} \qquad (1.1.9\text{-}13)$$

或

$$C = \sqrt{\gamma RT/M} \qquad (1.1.9\text{-}14)$$

式中：ρ——密度，kg/m³；

P——大气压强，Pa；

γ——气体中定压比热与定容比热之比；

M——分子量；

T——绝对温度，K；

R——普适气体常数，8315J/（kmol · K）

在空气中

$$C = 331.4\sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} \approx 331.4 + 0.6\theta \qquad (1.1.9\text{-}15)$$

式中：θ——空气摄氏温度，℃。

在液体中

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho K_j}} \qquad (1.1.9\text{-}16)$$

或

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho K_d}} \qquad (1.1.9\text{-}17)$$

式中：K_j——绝热压缩系数，ms^2/kg；

K_d——等温压缩系数、ms^2/kg。

在海水中声速的经验公式

$$c=1449.22+\Delta C_t+\Delta C_p+\Delta C_s+\Delta C_{stp} \quad (1.1.9\text{-}18)$$

式中ΔC_t、ΔC_p、ΔC_s是考虑水温t、水深d使压力p变化以及海水含盐量S对海水中声速C的修正值。ΔC_{stp} 是综合三种因素的修正值。本章列出海水含盐量$S=35‰$的声速表。

表 1.1.9-4　　**海水中的声速** (m/s)

t \ d	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S=35‰$，d=深度（km）；t=温度（℃）											
−4	1432.0	1448.7	1464.7	1481.5	1498.6	1515.9	1533.5	1551.2	1569.2	1587.4	1605.6
−2	39.9	56.0	72.4	89.1	1506.1	23.3	40.7	58.3	76.1	94.0	11.9
0	49.4	65.4	81.8	98.4	15.2	32.3	49.5	67.0	84.6	1602.2	20.0
2	58.4	74.4	90.7	1507.2	23.9	40.9	58.0	74.7	92.7	09.2	27.7
4	67.0	82.9	99.2	15.6	32.3	49.1	66.1	83.3	1600.5	16.9	35.1
6	75.2	91.0	1507.3	23.7	40.3	57.0	73.9	90.9	08.0	25.1	42.1
8	82.0	97.9	14.0	30.4	46.9	63.6	80.3	97.2	14.2	31.1	48.9
10	90.4	1506.3	22.4	38.7	55.2	71.8	88.5	1605.2	22.0	38.8	55.4
12	97.5	13.3	29.4	45.7	62.1	78.6	95.3	11.9	28.6	45.2	61.7
14	1504.2	20.0	36.1	52.4	68.7	85.2	1601.7	18.3	34.9	51.3	67.6
16	10.5	26.3	42.5	58.7	75.0	91.5	07.9	24.4	40.9	57.2	73.4
18	16.5	32.4	48.5	64.7	81.0	97.4	13.9	30.3	46.6	62.8	78.8
20	22.2	38.1	54.2	70.5	86.8	1603.1	19.5	35.9	52.1	68.2	84.1
22	27.6	43.5	59.6	75.9	92.2	08.6	24.9	41.2	57.4	73.3	89.1
24	32.6	48.6	64.8	81.1	97.4	13.7	30.0	46.3	62.4	78.2	93.9
26	37.4	53.4	69.7	86.0	1602.3	18.6	34.9	51.1	67.1	82.9	98.4
28	41.9	58.0	74.3	90.6	06.9	23.3	39.5	55.7	71.7	87.4	1702.8
30	46.2	62.3	78.6	95.0	11.4	27.7	44.0	60.1	76.0	91.7	07.0

在固体中

1)在无限固体介质纵波

$$C=\sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1.1.9\text{-}19)$$

2)无限固体介质横波

$$C=\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (1.1.9\text{-}20)$$

3)板中

(1)纵波（其波长$\lambda>h$）

$$C=\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu)^2}} \quad \lambda\gg h \quad (1.1.9\text{-}21)$$

(2)弯曲波（其波长$\lambda\gg h$）

$$C=\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}\cdot\sqrt{1.82fh} \tag{1.1.9-22}$$

4)棒中

(1)纵波(其波长$\lambda>\sqrt{S}$)

$$C=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1.1.9-23}$$

(2)弯曲波(其波长$\lambda\gg\sqrt{S}$)

$$C=\sqrt[4]{\frac{EI}{\rho S}}\cdot\sqrt{2\pi f} \tag{1.1.9-24}$$

其中,矩形截面棒(截面宽度为b、厚度为d,振动方向与d平行)

$$C=\sqrt[4]{\frac{E}{12\rho}}\cdot\sqrt{2\pi f} \tag{1.1.9-25}$$

其中,圆形截面棒

$$C=\frac{1}{2}\sqrt[4]{\frac{E}{P}}\cdot\sqrt{2\pi f\cdot 2r} \tag{1.1.9-26}$$

以上诸式中:

E——弹性模量,N/m^2;
ρ——密度,kg/m^3;
μ——泊松比;
f——频率,Hz;
h——板厚度,m;
S——棒截面积,m^2;
I——惯矩,m^4;
d——矩形截面厚度,m;
r——半径,m。

普通气体常温下声速,见表1.1.9-5。

表1.1.9-5 **普通气体常温下声速**

气体	化学式	温度 t ℃	密度 ρ $kg\cdot m^{-3}$	声速 c $m\cdot s^{-1}$	比热比 γ	dc/dt $m\cdot s^{-1}\cdot deg^{-1}$
空气		0	0.1293×10^{-3}	331.45		
氧	O_2	20		326.5		0.60
氮	N_2	20		349.0		
氢	H_2	20		1307.6	1.405	2.25
二氧化碳	CO_2	20		274.6	1.299	0.54
一氧化碳	CO	18		348.9		0.63
水蒸气	H_2O	27		432		

液体中的声速,见表1.1.9-6。

表 1.1.9-6 **液 体 声 速**

液　体	化 学 式	温度 t ℃	密 度 ρ $kg \cdot m^{-3}$	声速 c $m \cdot s^{-1}$	压缩系数 k $\times 10^{-11}$ $m^2 \cdot N^{-1}$	$-dc/dt$ $m \cdot s^{-1} \cdot deg^{-1}$	特性阻抗 ρc_L $\times 10^6 m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-1}$
水	H_2O	20	0.99823	1483	45.55	−3.08	1.480
甲醇	CH_3OH	20	0.7913	1121	100.6	3.30	0.8870
乙醇	C_2H_5OH	20	0.7893	1168	92.90	3.50	0.9219
乙二醇	$(CH_2OH)_2$	20	1.1131	1666	32.36	2.40	1.854
乙醚	$(C_2H_5)_2O$	20	0.7135	1006	138.5	5.45	0.7178
氯仿	$CHCl_3$	20	1.4870	1001	68.01	3.47	1.488
四氯化碳	CCl_4	20	1.5942	937.8	72.27	3.19	1.495
水银	Hg	20	13.5955	1451.0	43.494	0.460	19.73
0#柴油		20	0.8406	1385		2.7	1.164
大港航煤		20	0.7963	1298		3.0	1.034
大庆 2#航煤		20	0.7868	1290		3.1	1.015
66#汽油		20	0.7246	1171		3.7	0.8485
80#汽油		20	0.7055	1139		3.7	0.8036

固体中的声速，见表 1.1.9-7。

表 1.1.9-7 **固 体 中 的 声 速**

固　体	密 度 ρ $kg \cdot m^{-3}$	弹性模量 $E \times 10^{10}$ $N \cdot m^{-2}$	剪切弹性模量 G $\times 10^{10}$ $N \cdot m^{-2}$	泊松比 μ_r	声　速				特性阻抗 ρc_L $\times 10^7 m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-1}$
					c_B $m \cdot s^{-1}$	c_P $m \cdot s^{-1}$	c_L $m \cdot s^{-1}$	c_T $m \cdot s^{-1}$	
铁 Fe	7.7	20.6	8.03	0.28	5180	5390	5850	3230	4.50
镍 Ni	8.8	20.1	7.71	0.31	4785	5030	5630	2960	4.95
钨 W	19.1	35.4	13.1	0.35	4360	4600	5460	2620	10.42
锰 Mn	8.4	12.3	4.64	0.33	3830	4060	4660	2350	3.90
铝 Al	2.7	6.85	2.65	0.34	5040	5360	6260	3080	1.69
铜 Cu	8.9	12.3	4.55	0.35	3710	3960	4700	2260	4.18
黄铜	8.1	8.82	3.40	0.30	3300	3460	3830	2050	3.10
康铜	8.8	16.3	6.13	0.33	4300	4550	5240	2640	4.60
铅 Pb	11.4	1.64	0.586	0.44	1200	1340	2170	700	2.46
石英玻璃	2.7	7.50	3.21	0.17	5370	5450	5570	3515	1.45
火石玻璃	3.6	5.76	2.36	0.22	4000	4100	4260	2560	1.54
无铅玻璃	2.5	7.02	2.92	0.22	5300	5430	5660	3420	1.41
象牙	1.8	0.871			2200				
有机玻璃①	1.18		0.252	0.824			2720	1460	
聚苯乙烯①	1.05		0.128	0.341			2340	1150	0.246
聚乙烯①	0.92						1900		0.174
橡胶①	0.95						1550		0.147
胶木（硬橡胶）①	1.2	0.296			1570		2300		0.276
软木塞	0.2	0.0050			500				

① 这些高分子物质的声速随测试频率不同而变化，表中数据是 1 MHz 时声速值。

注：①C_B——棒中纵波声速。

②C_P——板中纵波声速。

③C_L——无限固体介质纵波声速。

④C_T——无限固体介质横波声速。

标准大气中的压力和声速，见图 1.1.9-6。

图为国际空间研究委员会 COSPAR 提出的标准大气（CIRA 1962）条件中的压力和声速。

2.2 场物理量

1)声压—声速

$$p=Z_s \cdot v \quad (1.1.9\text{-}27)$$

式中：p——声压，N/m²；

Z_s——声阻抗率，N·s/m³；

v——声速数值，m/s。

声阻抗率 （1）在空气中平面声波

$$Z_s=\rho C=Z_0 \quad (1.1.9\text{-}28)$$

式中：ρ——密度，kg/m³；

C——声速，m/s；

Z_0——声特性阻抗，N·s/m³。

（2）在空气中频率为f球面声波

$$Z_s=\rho C\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\lambda}{2\pi\gamma}\right)^2}} \quad (1.1.9\text{-}29)$$

式中：γ——球面声波球心到波面的径向距离；

λ——空气中波长，$\lambda=C/f$ m。

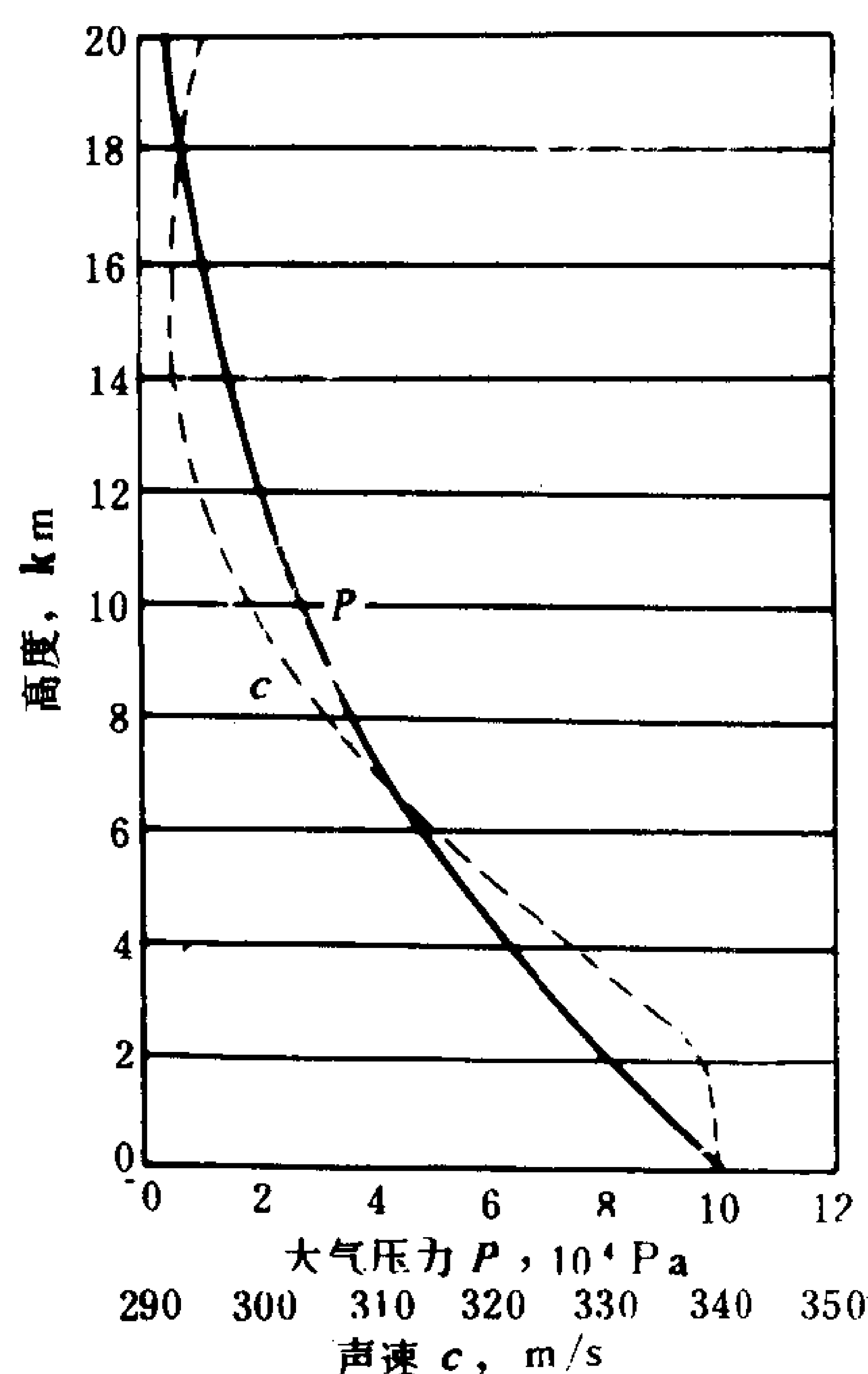


图 1.1.9-6 标准大气中的压力和声速

2)声速——声波振幅

$$A=\frac{v}{2\pi f} \quad (1.1.9\text{-}30)$$

式中：A——声波位移振幅；

v——速度振幅。

3)声速——声加速度

$$a=2\pi fv \quad (1.1.9\text{-}31)$$

式中：a——声加速度振幅，m/s²。

2.3 声强

$$I=\frac{p^2}{2\rho C} \quad (1.1.9\text{-}32)$$

在正弦声波中

$$p_{\text{eff}}=\frac{p}{\sqrt{2}} \quad (1.1.9\text{-}33)$$

$$I=\frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho C} \quad (1.1.9\text{-}34)$$

式中：I——声强，W/m²；

p_{eff}——有效声压，N/m²。

2.4 有关声场物理量的计算公式

1)混响时间

$$T = 13.8\frac{4\gamma}{AC} \tag{1.1.9-35}$$

在 20℃，760 mm 汞柱空气中

$$T = 0.161\frac{V}{A} \tag{1.1.9-36}$$

2)等效吸音面

$$A = \alpha S \tag{1.1.9-37}$$

3)有效声压

$$P_{eff} = 101.5\sqrt{\frac{TP}{V}} \tag{1.1.9-38}$$

上式用于围闭空间内，其混响时间为T，声源功率为P时的有效声压，在以上诸式中，T——混响时间，s；v——闭空容积，m^3；A——等效吸声面；α——平均吸声系数；S——封闭空间内的轮廓总面积；P——声源功率，W。

2.5 声压、声强、声功率与相应级的换算，见图 1.1.9-7。

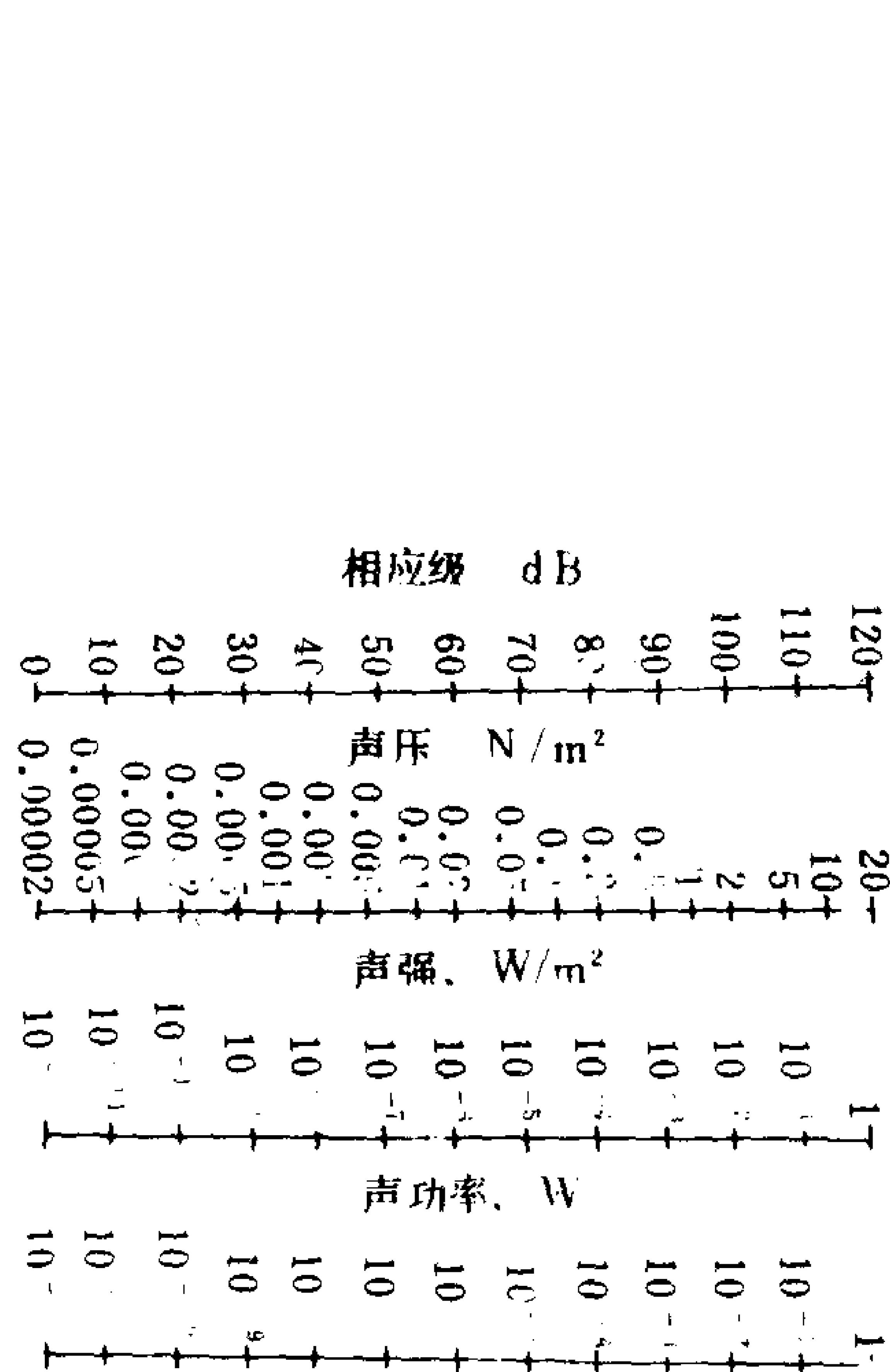
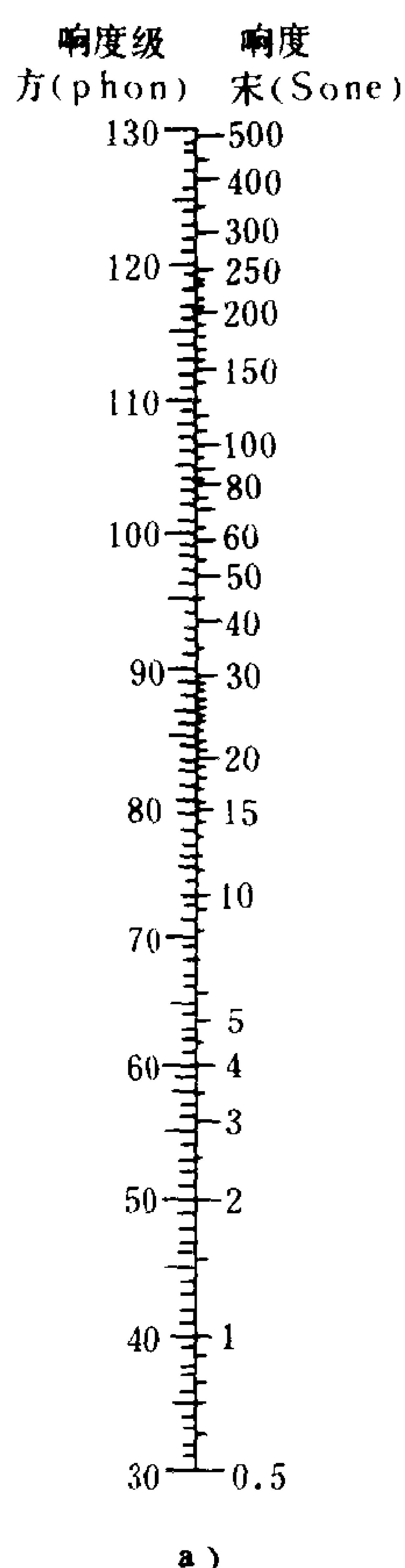
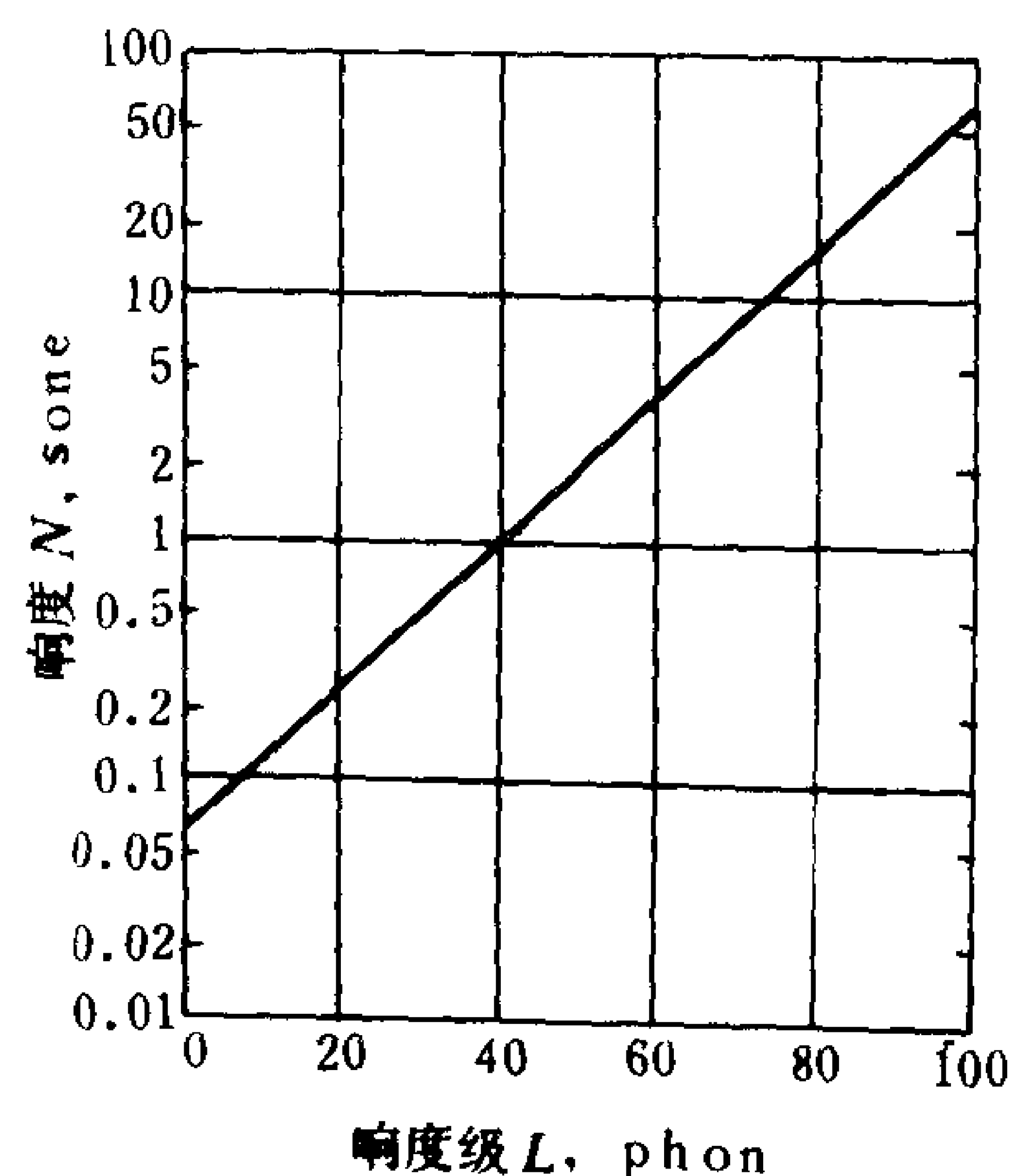


图 1.1.9-7
声压、声强、声功率与相应级的换算



a)



b)

图 1.1.9-8 响度级与响度的关系

2.6 响度级和响度的换算，见图 1.1.9-8

2.7 噪声的声压级，见表 1.1.9-8。

表 1.1.9-8 噪声的声压级

声源	距离 D m	距离为D时的声压级dB(A)
静夜、消声室内	1~1.5	10~20
怀表声	1	20
郊区噪声	—	30~40
普通谈话声	1	50~70
城市街道噪声	—	70
大的高声叫喊	1	90
重型汽车，泵房	1~1.5	90
压缩空气锤、电锯、锅炉厂铆锻车间	1.5~3	100~110
风铲、喷气飞机	10	120~130
火箭、导弹	10	160 以上

2.8 一些声源的声功率与声功率级，见表 1.1.9-9。

表 1.1.9-9 噪声的声功率与声功率级

声源	声功率W	声功率级 dB (A)
宇航火箭发射	$\sim 10^6$	200
喷气式飞机	若干 10^3	160
超声发生器	$\sim 10^3$	~150
大型扬声器	$\sim 10^2$	~140
大型钢琴最高功率	3×10^{-1}	115
小提琴最高功率	1×10	90
人发声的最高功率	2×10^{-3}	93
普通谈话声	7×10^{-6}	68.5

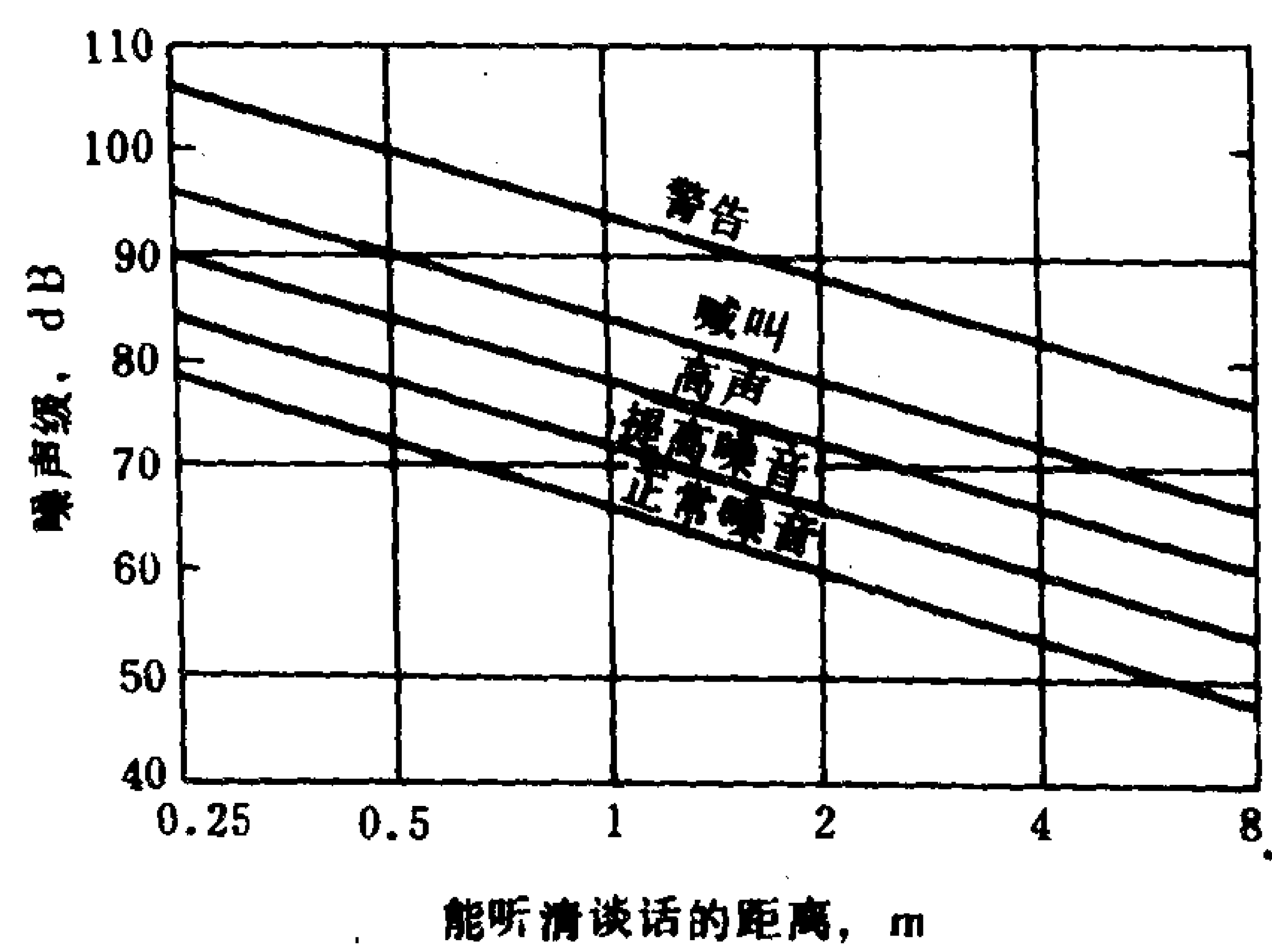


图 1.1.9-9 噪声环境中交谈距离

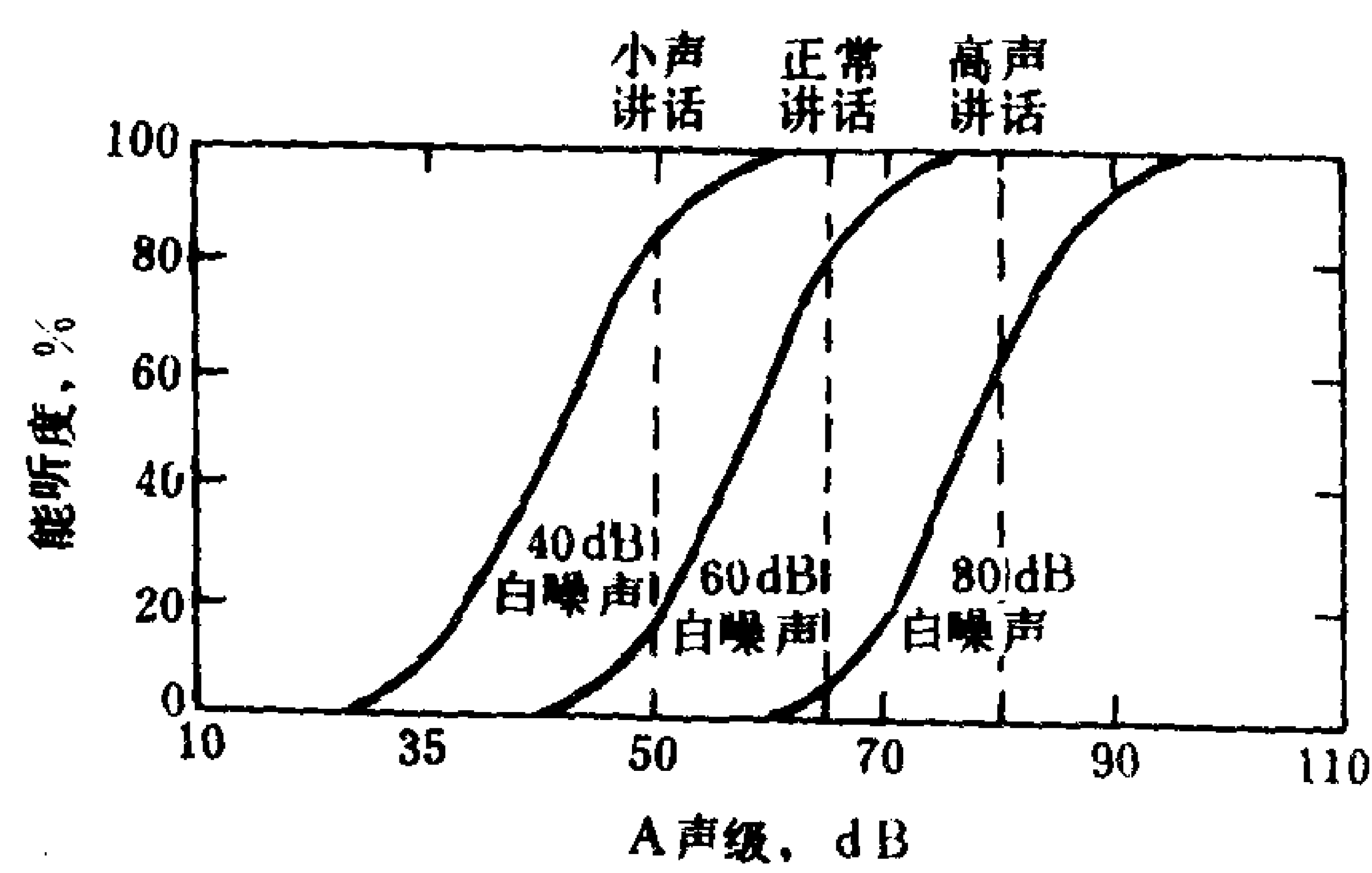


图 1.1.9-10 噪声环境中的语言能听度

2.9 噪声环境的交谈距离，见图 1.1.9-9。

2.10 噪声环境的语言能听度，见图 1.1.9-10

2.11 谈话质量，见表 1.1.9-10。

表 1.1.9-10　　谈 话 质 量

噪 声 级	50 dB 以下	50～70 dB	70～90 dB	90～110 dB	110～130 dB
对面交谈	正常噪音，相距 6 m能听清	提高噪音，相距 2 m 能听清	大声喊，只能相距 $\frac{1}{2}$m	最高噪音，相距$\frac{1}{4}$ m	相距 1 厘米也困难或不可能听到
电话	良好	满意	困难	要到隔声间内	要用特殊设备
对讲系统	良好	满意	不好，要用耳机听	要用耳罩和骨传导耳机	要用耳塞机和头盔
扩声系统	良好	满意	满意，或稍有困难	困难，要用抗噪声传声器	非常困难，用良好的抗噪声传声器

2.12 噪声适当范围，见表 1.1.9-11。

表 1.1.9-11　　噪 声 适 当 范 围

人的活动	最高值（dB）	理想值（dB）
体力劳动（听力保护）	90	70
脑力劳动（语言清晰度）	60	40
睡眠（休息）	50	30

3 光学

光学是研究光的基本性质、光的产生、传播、接收、显示及其与物质相互作用的科学。

3.1 光的基本性质

光是一种电磁波，具有波动性和粒子性。光的二重性是物质状态对立统一的反映。研究光在传播过程中的现象可由其波动性来解释；研究光与其它物质相互作用的现象，可用它的粒子性来解释。

光波包括可见光以及红外线和紫外线是电磁波谱中一个小波段，见图 1.1.9-11。

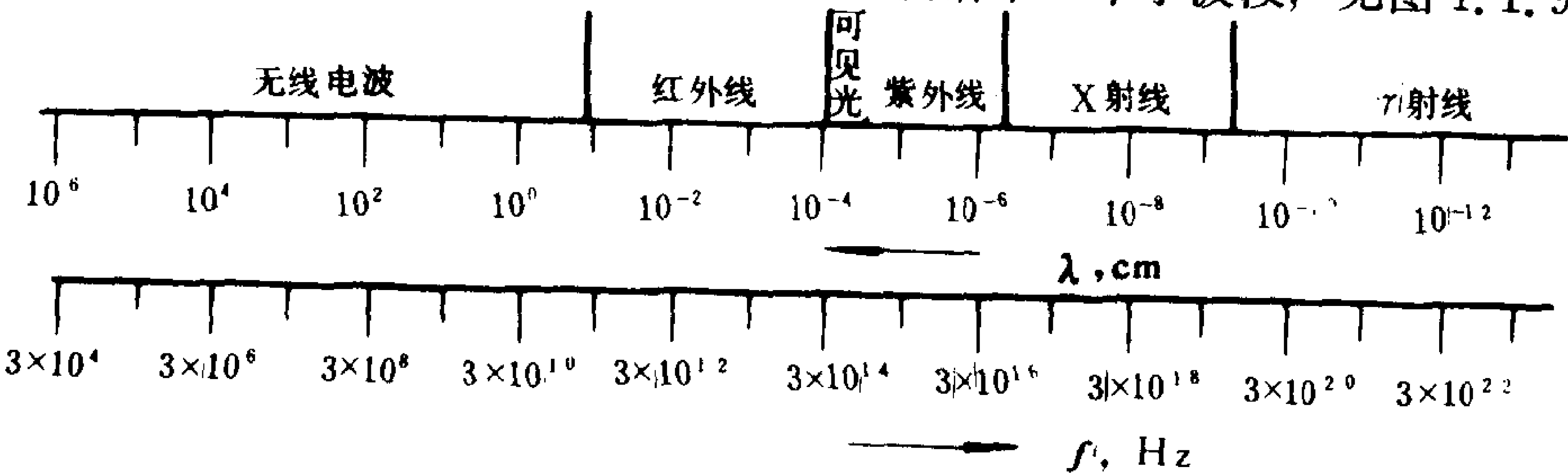


图 1.1.9-11　电磁波谱

光波是横波，可以用两个相互垂直的振动矢量（电场强度E和磁场强度H）以及与它们相垂直的波的传播方向来表示，见图 1.1.9-12。

光在x方向传播的平面波动方程是

$$E = E_0\cos(\omega t - kx + \varphi_0) \quad (1.1.9\text{-}39)$$

$$H = H_0\cos(\omega t - kx + \varphi_0) \quad (1.1.9\text{-}40)$$

式中：E——光波的电场强度；

H——光波的磁场强度；

E_0、H_0——电场、磁场强度的振幅值；

$\omega = 2\pi f$——时间角频率；

$K = 2\pi/\lambda$——空间角频率或称波数；

φ_0——初位相；

t——时间。

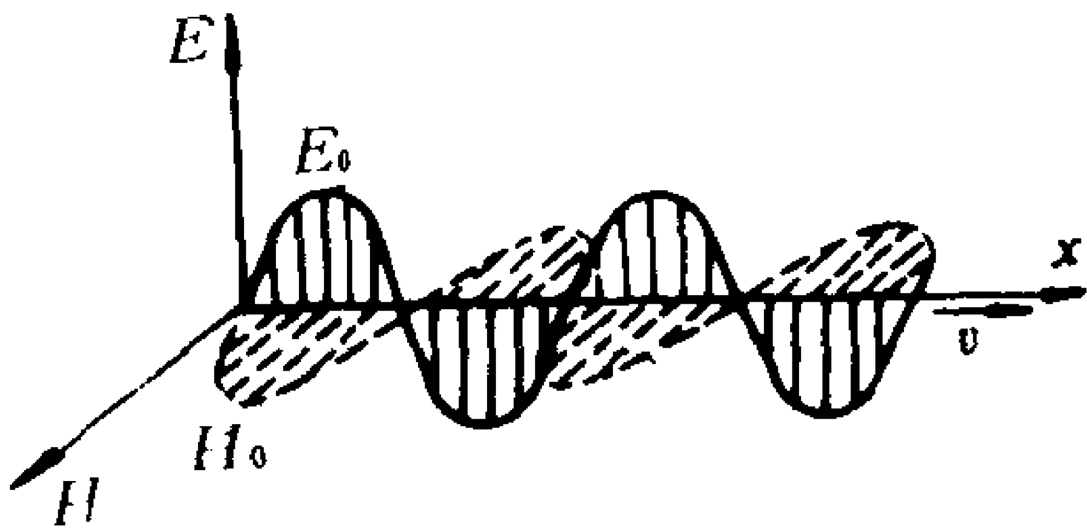


图 1.1.9-12 电磁波

光波在真空中的速度（C）约为3×10^8m/s，几种媒质中的光速如表 1.1.9-12 所示。

表 1.1.9-12 几种媒质中的光速

（钠光D线，波长为 589×10^{-6}mm）

真空	2.997925×10^8m/s	光学玻璃	1.98223×10^8m/s
空气（标准大气压 0℃）	2.99724×10^8m/s	水	2.24915×10^8m/s

3.2 光的传播

在几何光学中，用光线表示光波传播的方向。

1）光线传播定律——光线在均匀透明介质中按直线传播。

2）光路的可逆性——由正向或反向传播的光线，其光路相同。这一性质不论在均匀介质中传播，或经过任意次的反射和折射，都成立。

3）光经过两种均匀介质（1、2）的平滑界面（MM'）传播时发生反射和折射现象（见图 1.1.9-13）。它们遵循反射和折射定律。

（1）反射定律

①反射线（OR）位于入射线（OS）与法线（ON）所决定的平面内，反射线和入射线分别在法线两侧；

②反射角（i'）等于入射角（i）

（2）折射定律

①折射线（OP）位于入射线和法线所决定的平面内，折射线和入射线分别在法线的两侧；

②折射线的方向可按下列关系式求得：

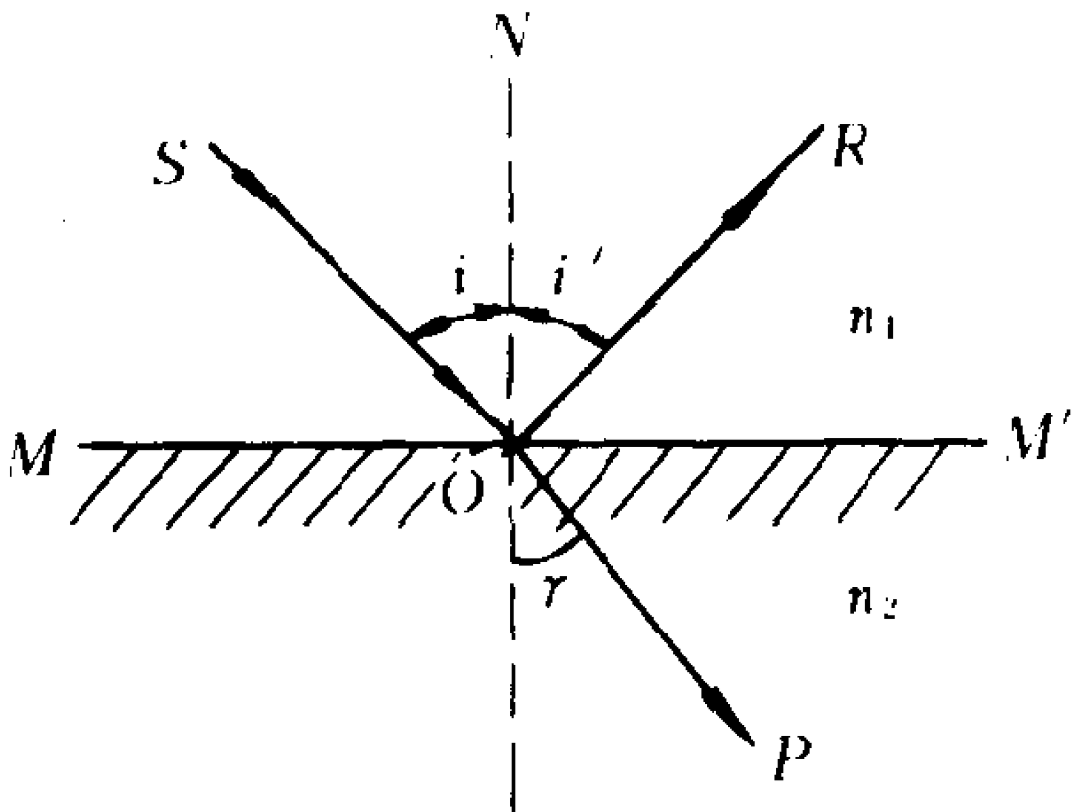


图 1.1.9-13 光在界面上的反射和折射

$$\frac{\sin i}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2.1} \quad (1.1.9\text{-}41)$$

式中：i、γ——分别为光线的入射角和折射角；

v_1、v_2——分别为光在介质 1、2 中的速度；

λ_1、λ_2——分别为光在介质 1、2 中的波长；

n_1、n_2——分别为光在介质 1、2 中的绝对折射率，而$n_{2.1}$为光由介质 1 进入介质 2 的相对折射率。

几种物质的折射率如表 1.1.9-13 所示。

表 1.1.9-13　**几种物质的折射率**（氦光d线，波长为 587.6×10^{-6}mm）

真　空	1.000	水	1.33	加拿大香脂	1.53	光学玻璃	1.523	硅	3.432 (3.00μ)
空　气	1.0003	Pyrex 玻璃	1.47	熔融石英	1.460	蓝宝石	1.755 (1.01μ)	锗	4.033 (3.42μ)

（在 0℃和 760 mmHg，用钠光，波长 589.3 nm）

氢	1.000132	氮	1.000296～1.000298	SO_2	1.000686
水蒸汽	1.000249～1.000259	CO	1.000346	苯	1.001700～1.001823
氧	1.000271	CO_2	1.000448～1.000454		

3.3　光的漫反射、全反射、散射、色散、光的吸收

1)光的漫反射——光投射在物体的粗糙面上时，向各方向反射，称为光漫反射。由于一般物体的表面不是绝对平整的，对光都有漫反射作用，所以人们才能从不同的方向看到它。几种物体表面的漫反射系数见表 1.1.9-14。

表 1.1.9-14　**几种物体表面漫反射系数**

照射表面	漫反射系数（%）	照射表面	漫反射系数（%）
石　灰	91	粘　土	16
白色塑料	90～92	月　亮	10～20
雪	78	黑　土	5～10
白　纸	70～80	黑丝绒	0.2～1

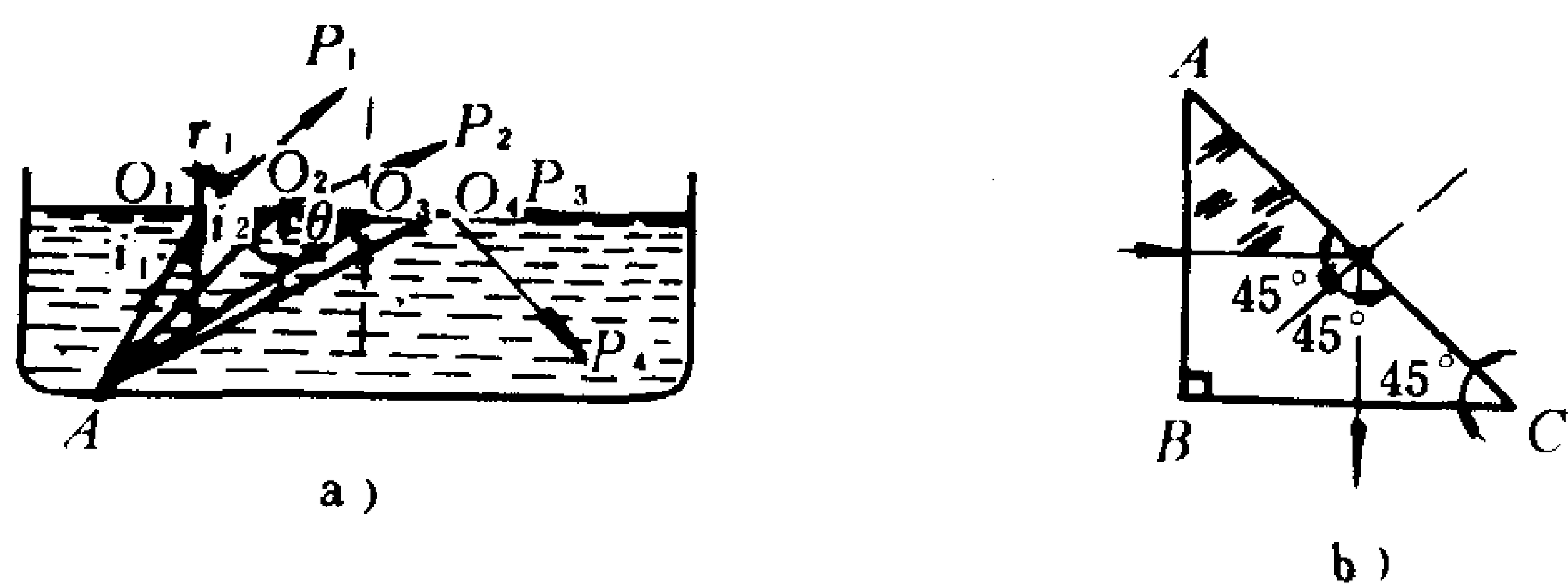


图 1.1.9-14　光的全反射

2)光的全反射——光从光密介质进入光疏介质时，一般是向偏离法线方向折射，但当入射角 (i) 增大到某个角度 (θ) 时，光线不再进入光疏介质而开始全部返回原来的光密介质（如图 1.1.9-14 a)）这种现象称为光的全反射，此时的入射角θ称为临界角，全反射的临界角为$\theta=\sin^{-1}(n_2/n_1)$。光由水进入空气时的临界角约为 48.5℃；从玻璃进入空气的临界角，视玻璃的折射率而异，约在 30°至 42°之间。光在等腰三棱镜内的全反射如图 1.1.9-14 b) 所示。

3)光的散射——光经过折射率起伏的介质或无规则分布的质点时，使光束弥散，称此为光的散射现象。例如在光束的侧面看到光束的经迹，就是由于观察到散射光。

4)光的色散——光在两种介质的界面上折射时，折射率的大小与波长有关，称此为光的色散现象。对于吸收系数很小的波段(透明波段)，当波长增大时，折射率减小，称正常色散；反之，波长增大时，折射率增大，称反常色散。对于透明波段，色散公式为

$$n=a+\frac{b}{\lambda^2}+\frac{c}{\lambda^4}+\cdots \qquad (1.1.9\text{-}42)$$

式中：　λ——光在真空中的波长；

n——折射率；

a、b、c……——与物质有关的常数。

3.4　平面镜、透镜、棱镜、光具组

平面镜是一个简单的、能成完善象的光学系统。平面镜所成的像是正立虚像，大小和物体相等。物与像对称于镜面，即分别在镜的前后，且离镜面的距离相等。

反射面为球面的镜，称为球面镜，可以成像。它有凹凸两种，凹镜的反射面为凹面，有使入射光会聚的作用，也称会聚镜；凸镜的反射面为凸面，有使入射光发散的作用，也称发散镜。

连接球面镜镜面顶点和球心的直线，称为球面镜的主轴。与主轴相近并与之平行的一束光线，被镜面反射后，反射光线（或其延长线）与主轴的焦点，称为焦点。镜面顶点和焦点间的距离称为焦距，它等于球面镜球半径的一半。

球面镜所成像的位置和性质，见图 1.1.9-15 和表 1.1.9-15。

表 1.1.9-15　　球面镜成象的位置和性质

球面镜	物体位置（MP）	像的位置（MQ）	像的性质
凹面镜	在∞处	在F处	实像
	在∞与C点之间	F点与C点之间	实像，倒立，缩小
	在C点	在C点	实像，倒立，同大小
	在C与F点之间	在C与∞之间	实像，倒立，放大
	在F点	在∞处	
	在F与M点之间	在镜后∞处至M点之间	虚像，正立，放大
	在M点	在M点	虚像，正立，同大小
凸面镜	在∞处	在F点	虚像
	在∞与M之间	在F至M点之间	虚像，正立，缩小
	在M点	在M点	虚像，正立，同大小

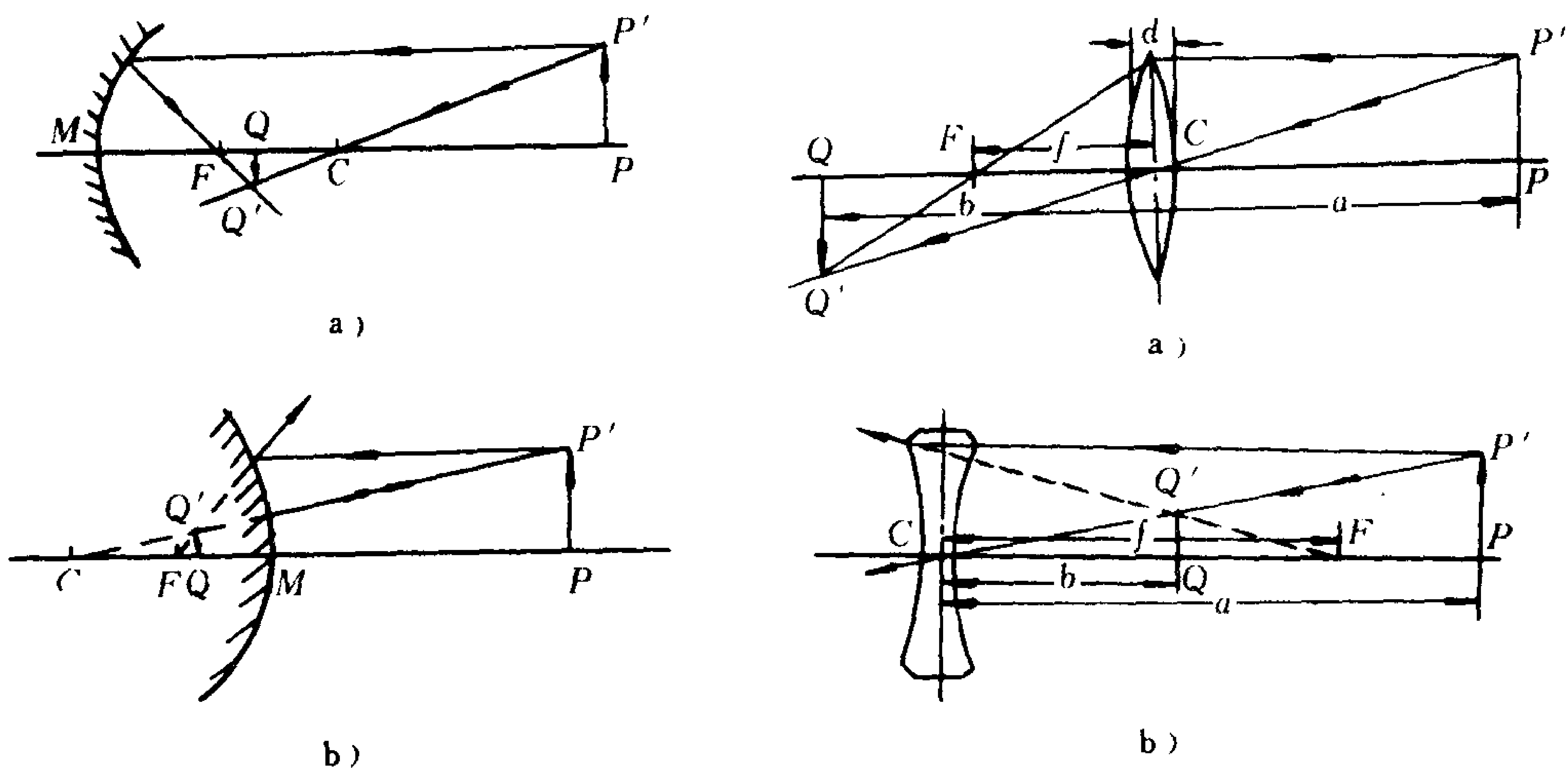


图 1.1.9-15　球面镜成象

图 1.1.9-16　球面透镜成象
a) 凸透镜；b) 凹透镜

透镜——由透明的物质（如玻璃，水晶等）制成的两个共轴球面折射体称为透镜，光线通过透镜折射后可以成像。它分为凸透镜和凹透镜两大类，前者中央部分比边缘部分要厚，有会聚光线的作用；后者有发散光线的作用。

透镜镜面中心的连线，称为主轴。平行光束经过透镜折射后的交点，称为焦点。位于主轴上的焦点称为主焦点。一面透镜有前后两个主焦点。

球面透镜成像的位置和性质可按以下公式计算，如图 1.1.9-16 所示和见表 1.1.9-16。

表 1.1.9-16　**球面透镜成象的位置和性质**

透镜	物体位置	象的位置	象的性质
凸透镜	$a=+\infty$	$b=f$	实象
	$\|2f\|<a<+\infty$	$f<b<2f$	实象，倒立，缩小
	$a=\|2f\|$	$b=2f$	实象，倒立，同大小
	$\|f\|<a<\|2f\|$	$2f<b<\infty$	实象，倒立，放大
	$a=\|f\|$	$b=\infty$	
	$0<a<\|f\|$	$-d<b<-\infty$	虚象，正立，放大
凹透镜	$a=+\infty$	$b=f$	虚象
	$0<a<+\infty$	$0<b<f$	虚象，正立，缩小

球面透镜成象的计算公式

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \qquad (1.1.9\text{-}43)$$

或
$$f=\frac{ab}{a+b}=\frac{am}{(m+1)}=\frac{b}{m+1}$$

式中：f——透镜焦距（凹透镜取正号，凹透镜取负号）；

a——物距①；

b——像距①（实像取正号，虚像取负号）；

m——放大率，即像的大小与物的大小之比。

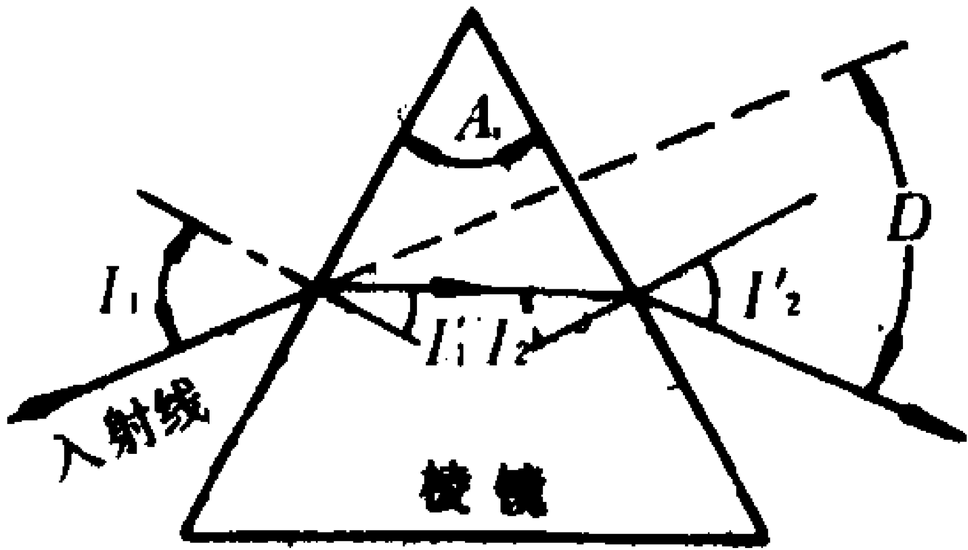


图 1.1.9-17　棱镜的色散

棱镜——由透明材料制成的多面体称棱镜。最常用的三棱镜具有三个面，它可将复色光分解成不同波长的单色光，也可以用来改变光的行进方向，如图 1.1.9-17 所示。

复色光经过棱镜分光后按波长的大小依次排列的图形，称为光谱。炽热的固体、液体或高压气体往往发射连续光谱，太阳光谱就是一例。各种光的波长范围见表 1.1.9-17。

表 1.1.9-17　**各种光的波长范围**

光的种类		波长范围 Å	光的种类		波长范围 Å	光的种类		波长范围 Å
红外线		7700～10^7	可见光	黄	5970～5770	可见光	蓝	4550～4300
可见光	红	7700～6220		绿	5770～4920		紫	4300～3900
	橙	6220～5970		青	4920～4550	紫外线		3900～400

光具组也称“光学系统”，是按某种方式排列的，使光线发生折射或反射的一系列面镜、透镜、棱镜及光阑等的组合体。

① 不少公式中，物距用μ，象距用ν代表。

光通量是根据人眼视觉来度量的光源辐射能量，光学中常用物理量见表 1.1.9-18。

表 1.1.9-18　　**光学中常用物理量**

名称	说明	计算公式
光通量	根据人眼视觉来度量的光源辐射能量	$F=634\,V_\lambda W_\lambda \mathrm{lm}$ V_λ——视见函数 W_λ——辐射功率
发光效率	光源发出的总光通量与其辐射功率之比	$K=\frac{F}{W}$ lm/W
发光强度	光源沿某一方向的单位立体角内所发出的光通量	$I=\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}\Omega}$ $I=\frac{F}{\Omega}$（对于均匀发光）
面发光强度	单位面积所发出的光通量	$M=\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}S}$ ph 或 lx $M=\frac{F}{S}$（对于均匀发光）
照度	被照明表面上单位面积所接受的光通量	$E=\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}S}$ ph 或 lx $E=\frac{F}{S}$（对于均匀照明）
亮度	沿法线方向单位面积的发光强度	$B=\frac{I}{\mathrm{d}S_n}=\frac{I}{\mathrm{d}S\cos\alpha}$ sb （α为与法线的夹角）

光具组的透过率τ是指从系统射出的光通量与射入光通量之比。

光通过光具组时的光能损失有两个方面：其一是光束在各光学元件表面上的反射；另一是光学元件对光能的吸收。在光具组中不同材料构成的元件镜面的反射率（反射光强度与入射光强度之比）不同，同时反射率的数值还与光的入射角（i）大小，分界面周围媒质的种类有关。但当$i<30°$时，可以认为反射率不变，一般取玻璃与空气界面的平均反射率为 0.04，镀铝镜面为 0.85，镀银镜面为 0.90，又光学玻璃的透明率（射出和射入光通量之比）可取平均值 0.99。由此，可以计算上述光学元件组成的光具组的透过率τ为

$$\tau=(0.85)^m(0.90)^n(1-0.04)^p(0.99)^l \tag{1.1.9-45}$$

式中：m——镀铝面个数；

n——镀银面个数；

p——玻璃与空气的界面个数；

l——沿光轴计算的玻璃总厚度，cm。

3.5　光的干涉现象

干涉现象是波动过程的基本特征之一。两束频率相同、振动方向相同，相位差恒定的光波相遇时，在某些地方的振动始终加强，而另一些地方的振动始终减弱，因而出现明暗不同的条纹现象，称为光的干涉。能产生干涉现象的两束光叫做相干光，它们的光源叫做相干光源。

获得相干光的方法有：

1）分波前法——即将光源S限制到适当大小，见图 1.1.9-18，在其波前上分割出几部分

作用相干光源（S_1、S_2）。如双缝、双镜、单镜和双棱镜法都属于这一类。

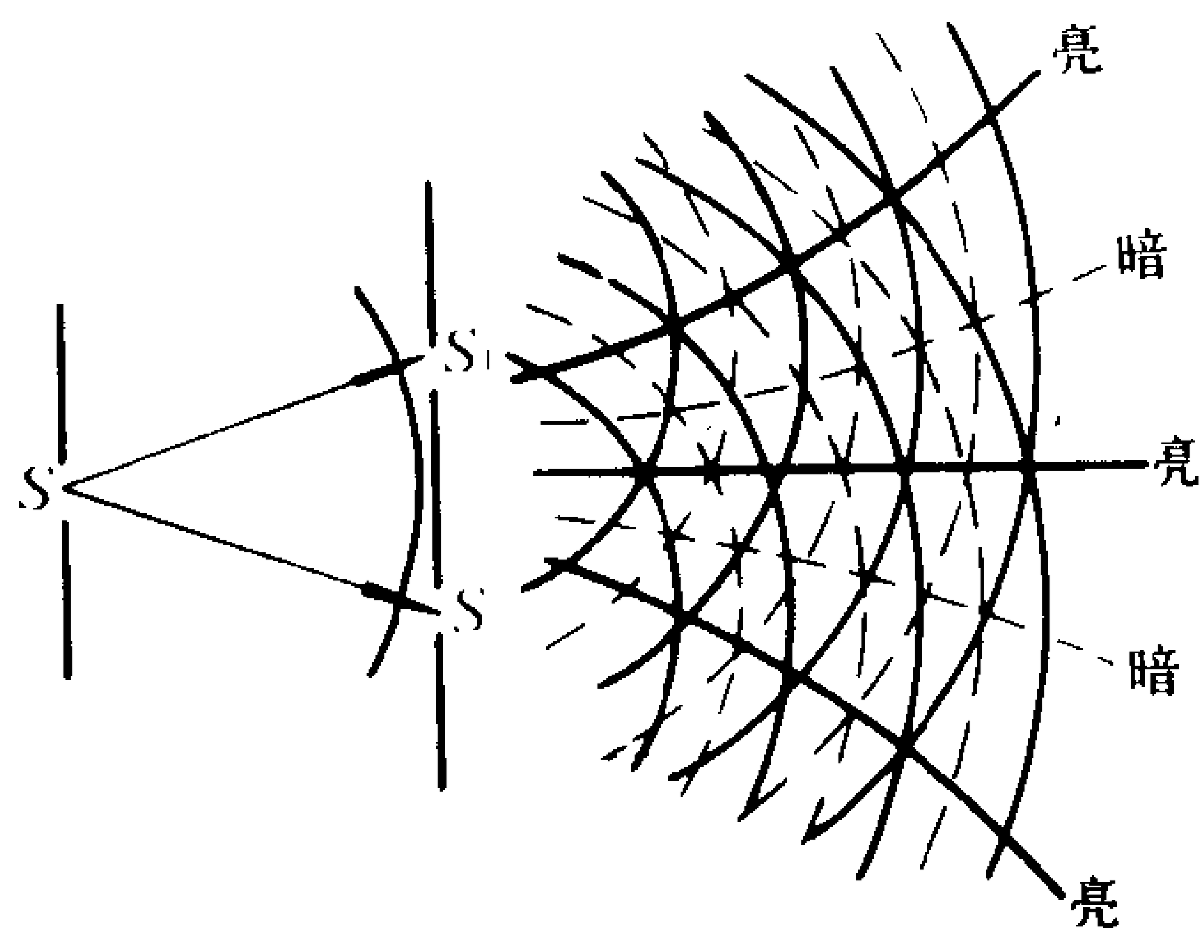


图 1.1.9-18　双缝干涉

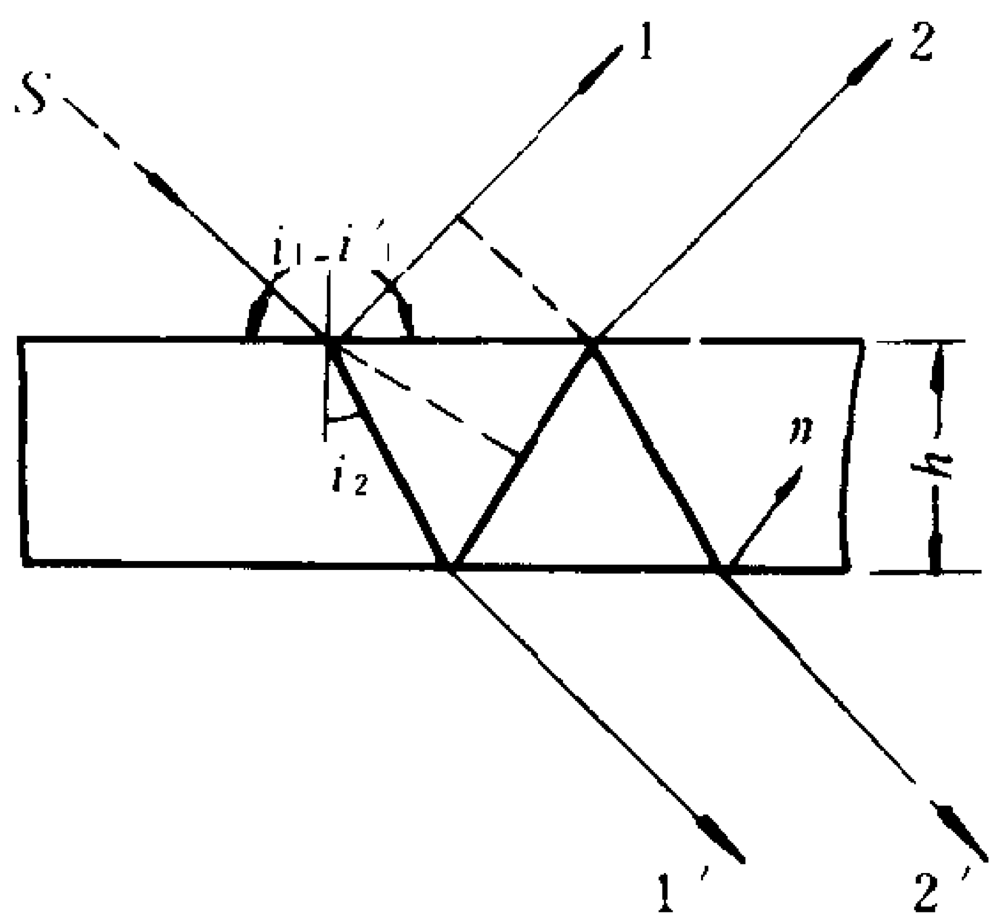


图 1.1.9-19　薄板干涉

2）分振幅法——将波前的同一部分按一定振幅比例分为两束光或多束光，经过不同路径后再使其相遇，即得相干光 1.2，见图 1.1.9-19 所示。利用透明薄板、劈尖等所形成的相干光源，即属于此类。

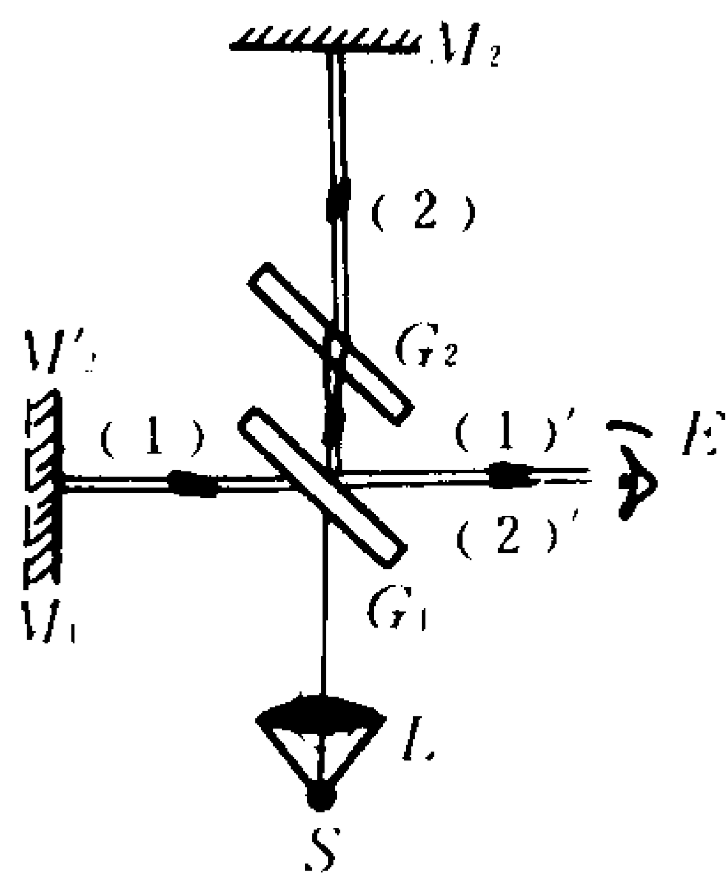


图 1.1.9-20　迈克尔逊干涉仪简图

迈克尔逊干涉仪是利用劈尖干涉原理制成。如图 1.1.9-20所示，M_1、M_2是两块经过磨光的平面镜，G_1、G_2是两块平板玻璃，在 G_1上镀有薄层银膜，使照射在其上的光一半反射，一半透射。G_1与G_2严格保持平行，并与 M_1和 M_2倾斜成 45°角。这里M_1是固定的，M_2可由螺旋测微计控制进行微小移动。

自光源S发出的光，经过透镜L后变成平行光射入G_1，于是一部分在薄银层上反射，向着 M_1传播（1），并被 M_1反射而再穿过 G_1、向E方向进行（1′）；另一部分则穿过薄银层及 G_2向M_2传播（2），经 M_2反射后再穿过 G_2 到达 G_1薄银层上，被反射后，也向E方向传播（2′）。（1′）、（2′）两条光线即构成相干光，并在E处可看到干涉条纹。

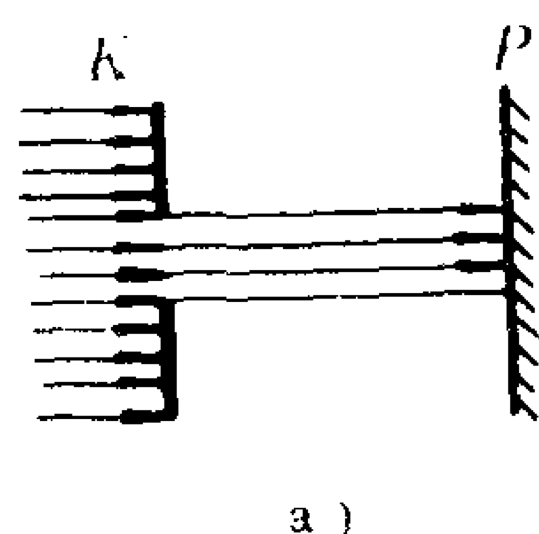
这里，M_2'是由镀银层所形成的 M_2的虚像。如果M_1与M_2不是严格的垂直，则 M_1与M_2'就不是相互平行，而犹如一个劈尖。

通过迈克尔逊干涉仪等方面产生的光的干涉现象，在科学研究和生产技术工作上得到了广泛应用，例如：精确地测定长度，检测金属表面的磨光程度；通过对光谱线波长的准确、详细的研究，推测出原子内部的结构；通过极准确地测定各种液体的折射率的变化，来判断液体中所含微量杂质等。

3.6　光的衍射现象、光学仪器的分辨率

衍射（或称绕射）现象也是波动过程的基本特征之一，它表明波能绕过障碍物而弯曲地向前传播。一束平行光通过宽窄可调节的狭缝K后，在屏幕上呈现光斑E。若狭缝宽比波长大得多时，屏幕上的光斑和狭缝完全一致，这时光可以看成是沿直线传播，如图1.1.9-21所示。若缩小缝宽使它可以与光波波长相比较时（10^{-4}m 数量级以下），则在屏幕上出现的光斑亮度

降低，但其范围反而增大，而且出现明暗相间的条纹，如图1.1.9-21 b）所示。这就是光的衍射现象。



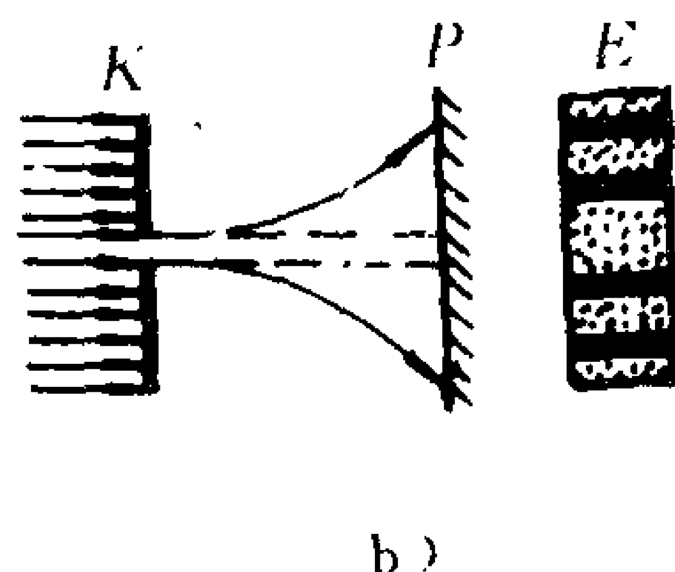


图1.1.9-21　光的衍射现象

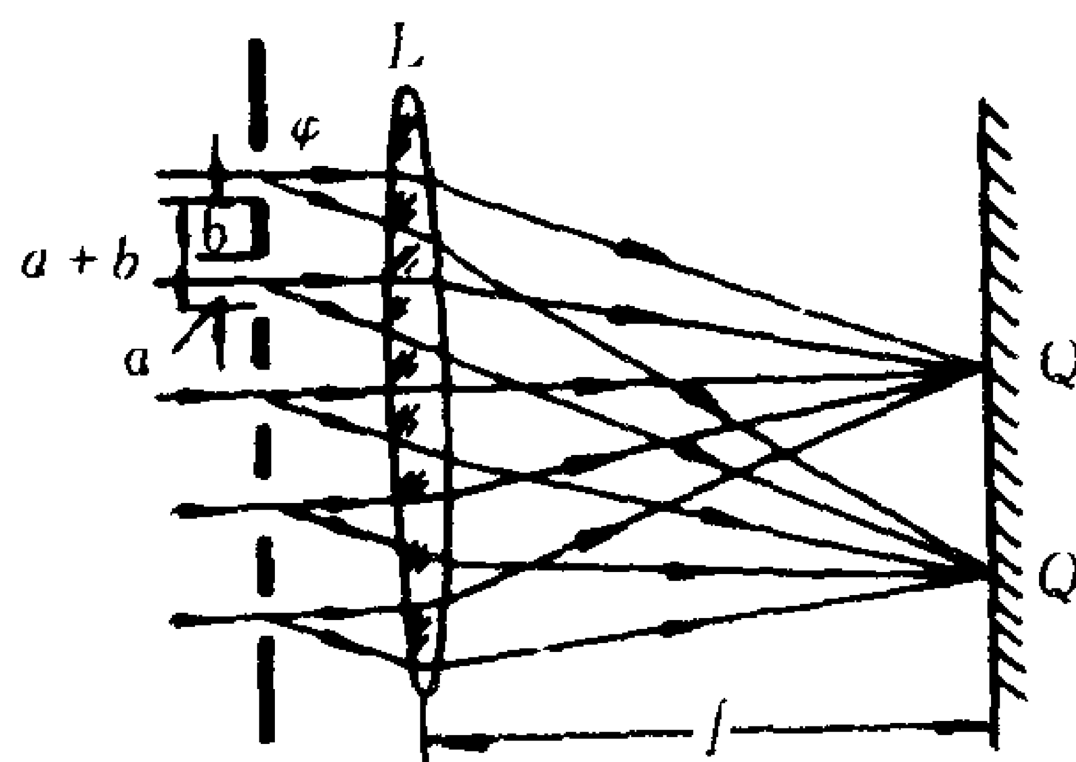


图1.1.9-22　平行衍射光栅（实际装置中$f \gg a+b$）

当平行光照射在宽度远较长度为小的单缝上时，也可在屏上观察到衍射条纹，此即单缝衍射。单缝衍射条纹在缝较宽时，明暗亮度较强，但条纹之间的间隔很窄，若使缝很窄，虽然此时可获得间隔较宽的条纹，但亮度较小，不够清晰。实用上常用衍射光栅，如图1.1.9-22所示，它是由平行地排列在一起的许多间距相等而具有一定宽度的狭缝构成。当一束平行单色光射到光栏上时，每一狭缝都要产生衍射，这些衍射光波之间又互相发生干涉现象，如用透镜L把这些光束会聚到屏幕P上，即可看到衍射和干涉作用所形成的光栅衍射条纹。

若光栅的缝宽为a，两缝之间的不透光部分宽度为b，则$(a+b)$叫做光栅常数。一般$a+b$的数量级约为10^{-5}～10^{-6}m。如果单色入射光的波长λ，则对于某一衍射角φ的光束在屏幕上形成明条纹的条件是：

$$(a+b)\sin\varphi = K\lambda (K=0,\ \pm1,\ \pm2,\ \cdots) \tag{1.1.9-46}$$

上式称为光栅公式，其中K称为衍射的级。

通过衍射光栅获得的亮度大，宽度窄而又分得很开的条纹，可用来测量波长。

当白光投射到光栅上，由于所含有的不同波长的单色光将产生各自对应的衍射条纹，又由同级条纹组成一个光带，这些光带的整体叫做衍射光谱。依据不同材料所特有的光谱的谱级结构进行比较分析，可以定性和定量地分析出材料中所含有的元素和杂质，这种分析方法叫做光谱分析，广泛应用于科学研究和工业技术上。

从几何光学来看，在物体通过光学仪器成象时，每一个物点有一个对应的象点。但是由于光的衍射，物点的象就不是一个单纯的几何点，而是有一定大小的亮斑。如果两个物体的距离太近，以致对应的光斑互相重叠，这时就不能清楚地分辨出两个物点的象。所以光的衍射现象限制了光学仪器的分辨能力。

设在远处有两个点光源，它们各自发出的光到达透镜L时，可看成是平行光，在透镜焦平面上形成两个衍射图样。当两个图样的中心距离小于衍射图样中心亮环半径时，就认为两个光源的像不能被分辨清楚，这时两个点光源对透镜中心的张角小于最小分辨角θ_0（rad）

$$\theta_0 = 1.22\frac{\lambda}{D} \tag{1.1.9-47}$$

式中：λ——光波波长；

D——透镜直径。

通常将光学仪器的最小分辨角的倒数叫做最小分辨率。

望远镜的分辨率是以它对两物体的最小分辨角θ来量度。

$$\theta=1.22\frac{\lambda}{D} \tag{1.1.9-48}$$

由于仪器种类不同以及所分辨的对象不同，分辨本领的衡量方法也不同。对于照相系统来说，其分辨本领是以某一规定的长度内，能够分辨的平行直线的条数来量度，此条数(N)与照相系统物镜的相对孔径的关系为

$$N=\frac{1}{1.22\lambda}\frac{D}{f} \tag{1.1.9-49}$$

式中：f——物镜的焦距。

3.7 光的偏振现象、双折射现象

光是电磁波，具有横波的性质，因为光效应主要由电场引起，因而电场振动方向定为光的振动方向。光在各个振动方向上的振动强度相等的光称为自然光。振动方向具有一定规则的光波是偏振光。若光波总是沿某一确定方向反复振动，称为线偏振光。

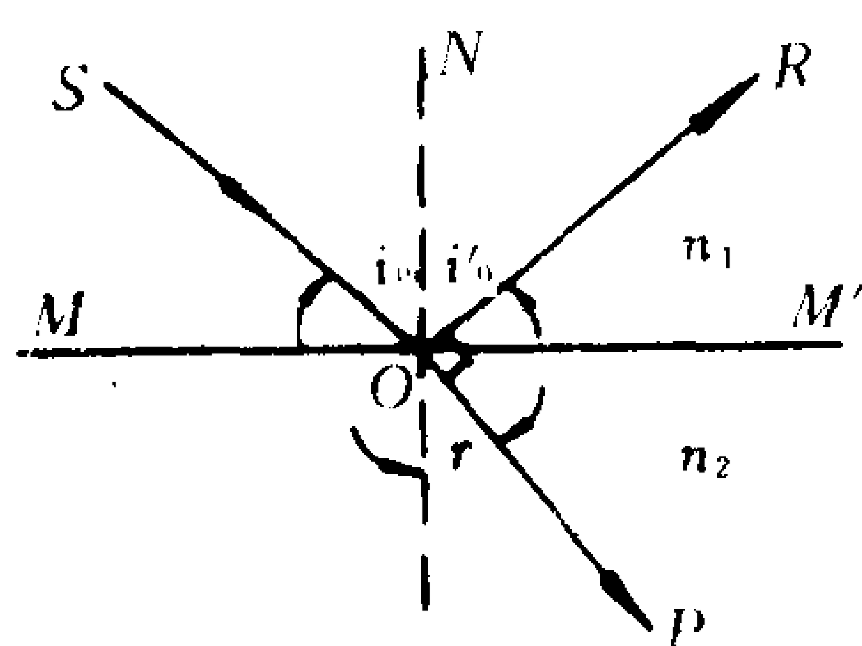


图 1.1.9-23　由反射和折射产生偏振光

偏振光可以由反射、折射、散射获得。一束自然光由空气射入到与玻璃的介界面上时（见图 1.1.9-23）产生反射现象和折射现象。由于反射光(OR)中垂直入射面的光振动比较强；而折射光(OP)中在入射面内的光振动比较强，因此它们都可以称为部分的偏振光。当入射角i_0满足$\mathrm{tg}i_0=n_2/n_1$时，反射光即可成为完全偏振光，而折射光仍为部分偏振光，但此时它的偏振化程度在经过一次反射中已达到最强。如果要把折射光变为完全偏振光，则可使自然光在上述入射角为i_0(称为起偏振角)条件下，通过一系列的平行玻璃片（或称玻璃堆）的多次反射，来逐步提高偏振化程度而达到。

利用偏振光片产生偏振光，某些晶体（如电气石）能让一个方向上振动的光通过，而把垂直于这个方向上的振动的光吸收，如图 1.1.9-24 所示，晶体的这种性质叫做二向色性。人工制造的二向色性偏振片，用来产生或检验偏振光的。

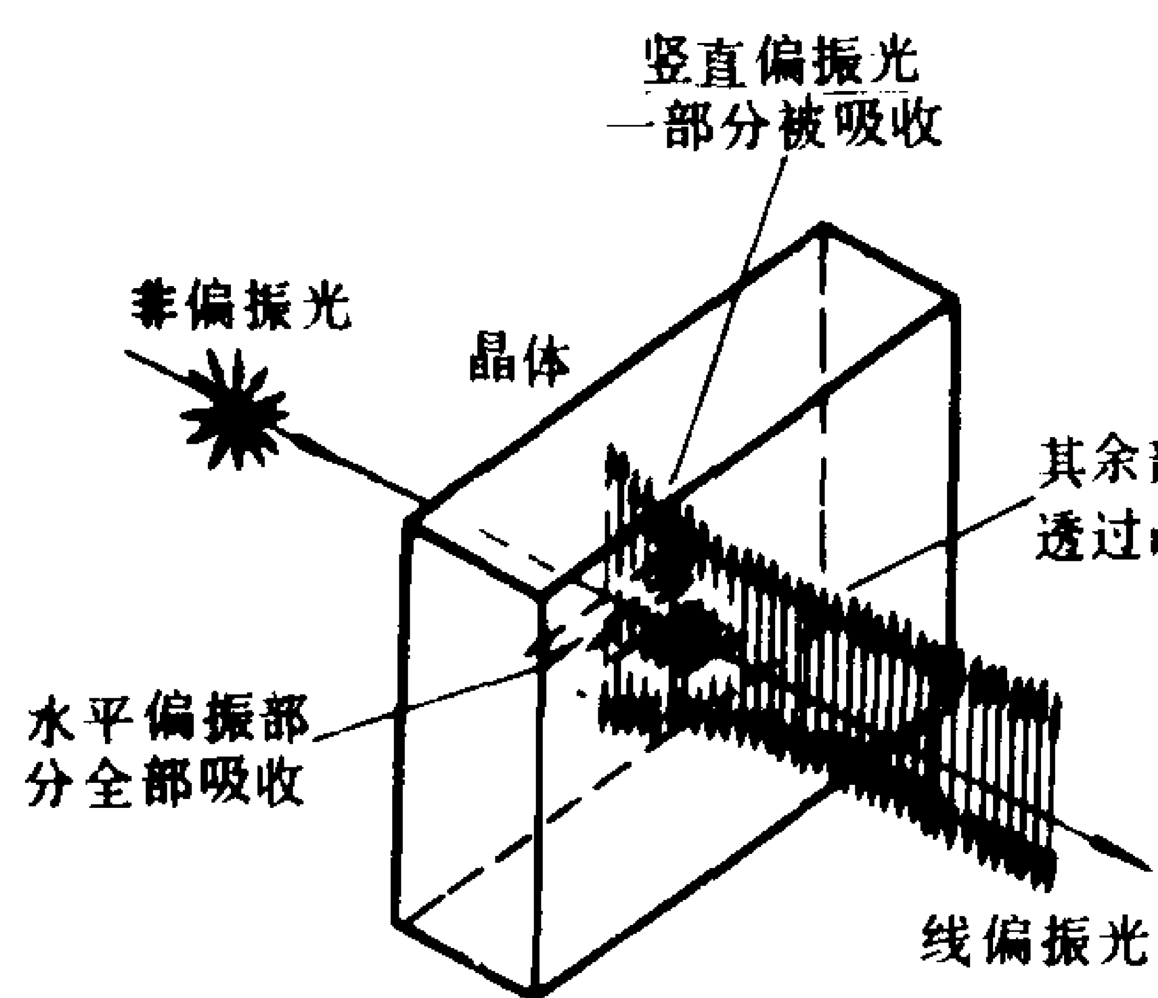


图 1.1.9-24　晶体的二向色性

当偏振光通过某些物质（如糖溶液、酒石酸溶液、松节油、氯酸钠、石英晶体等）后，其振动面（即光波振动方向与传播方向所形成的平面）会发生旋转，即偏振光的振动方向会以光的传播方向为轴线转过一定的角度，这种现象称为旋光现象。具有这种性质的物质叫做旋光物质。光通过旋光物质，振动面转过的角度与物质种类、溶液浓度、物质厚度有关，工业上所用的旋光仪即应用这个原理来测定糖溶液的浓度。

双折射现象，一束光线在两种各向同性的媒质分界面上发生折射时，其折射光的方向是由折射定律决定；但当光线进入方解石晶体（各向异性媒质）时，其折射光被分成为两束：

一束光按着折射定律的方向传播，叫做寻常光线；另一束光线不按着折射定律，且折射光一般不在入射内，这束光叫做非寻常光，这两束折射光都是偏振光，其振动方向互相垂直。上述现象称为光的双折射。

除了天然的各向异性晶体能发生光的双折射现象外，对于一般各向同性的物质也可通过外界作用（如加压力，外加电场或磁场等）人为地改变其特性来获得双折射现象，后者在生产和科研工作中获得了重要作用，如光弹仪。

3.8 光的微粒性、光电效应

光子，依据爱因斯坦对于光的粒子性假设：光是以光速C运动的粒子流，这些粒子名为光子，也叫光量子。每一个光子都具有一定的能量，光的频率愈高，光子的能量也愈大。对于频率为γ的光子所具有的能量ε：

$$\varepsilon = h\gamma \qquad (1.1.9\text{-}50)$$

式中：h——普朗克常数，为6.626×10^{-24}J·S。

光子还有一定的质量和动量，按着相对论的质能关系可得到：

$$m=\frac{\varepsilon}{c^2}=\frac{h\gamma}{c^2} \qquad (1.1.9\text{-}51)$$

式中：m——光子的质量；

c——光子运动速度；

γ——光的振动频率。

光子的动能（p）为

$$p=mc=\frac{h\gamma}{C} \qquad (1.1.9\text{-}52)$$

光电效应，物体受到光的照射而有电子逸出的现象称为外光电效应，光电管就是根据这一原理而制成的。由于光照而逸出的电子叫做光电子，光电子在外加电场作用下作定运动形成的电流叫做光电流。

按照光的粒子性假设可以说明上述光电效应：由于受光照射的金属中的自由电子吸收光子的能量后，有可能从金属中逸出。电子吸收一个光子所获得的能量为$h\gamma$，其中一部分消耗于所需的逸出功A，另一部分则被转换为电子的初动能$\frac{1}{2}mv_0^2$。按照能量守恒与转换定律，可得到下列爱因斯坦方程：

$$h\gamma = A+\frac{1}{2}mv_0^2 \qquad (1.1.9\text{-}53)$$

因此，当入射光子的能量$h\gamma$小于电子逸出功A，则电子就不能从金属中逸出；电子的初动能也和入射光的频率成线性关系，而与入射光的强弱，即光子数多少无关。入射光的强度（即光子数量）仅与光电流大小成正比。

另一类光电效应，表现在某些半导体材料受光照射时，在内部激发出导电载流子，使材料的导电率显著增加，这种现象称为内光电效应。利用硒、硫化镉制成光电池，p-n 结硅光电池以及光敏电阻等，都是根据内光电效应制成。

3.9 激光、全息术

激光器是近代出现的新光源，它发射出的光颜色很纯（单色性好），能量集中（亮度高），

方向性强，具有相干性。由于激光具有上述种种特性，它已在很多方面得到应用。

激光的原意是受激发射引起光放大。激光产生机理：激光器的发光与激光工作物质的原子能态的改变有关。当用适当方法从外部传输给激光工作物质以一定的能量（如光照射、电子撞击时），其内部原子从基态被激发到高能级；但原子的激发态是不稳定的，它有力图回到最低能级的趋向。导致这种使原子能态由高能级跃迁到低能级的原因可以是：1）自发跃迁——原子自发地产生跃迁，常用的光源中由于产生这种跃迁而发光；2)受激跃迁——即受到外来光子的带动而触发原子能级的跃迁，此时并有新的光子产生。作为受激跃迁的一个特征，即它所发出的光子与外部投影来的光子具有完全相同的性质（包括光波的频率、相位、偏振和传播方向)。如在受激跃迁过程中这种光子的数量不断的累积，使其辐射能量大大超过由于自发跃迁所产生的光辐射，于是便形成了激光和它所具有的一系列特性。

一个激光器主要由工作物质、激励能源和谐振腔所构成。工作物质有气体（如He-Ne、Ar^+、Ke^+、CO_2、N_2、$He\text{-}C_d$等)，固体(如红宝石、钕玻璃、钇铝石榴石等)、半导体(如砷化镓）和液体。

激光在工业、医疗、军事、科研、精密测量和加工、通信及信息处理等许多领域都有广泛的应用。

全息照相或称全息术，它与普通照相不同，普通照相以光的直线传播、光的反射、折射等几何光学的规律为基础，底片所记录的是物体各点的振幅平方(光强度)；全息照相则以光的干涉和衍射原理为基础，借助参考光将物体光波前振幅和位移分布记录下来。

全息再现像是非常逼真的立体像，当以不同的角度观察时，能够看到物体不同的侧面。因为物体上每一点的光源记录在整个全息图上，所以全息图分成若干小块，每块都能再现出一个完整的物体像。

参考文献

〔1〕马大猷，沈山豪：声学手册，科学出版社，1983，1。

〔2〕机械工程手册与电机工程手册编辑委员会：机械工程手册；电机工程手册，机械工业出版社。

〔3〕李景镇：光学手册，陕西科学技术出版社，1986，5。

第10章 化学基础

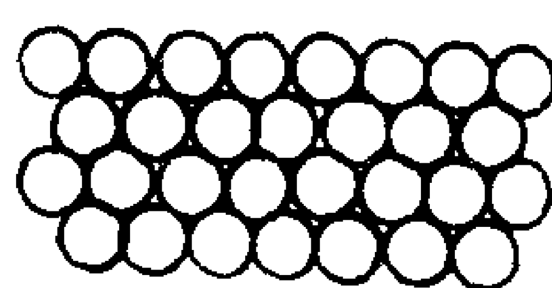
1 无机化学基础知识

1.1 聚集态

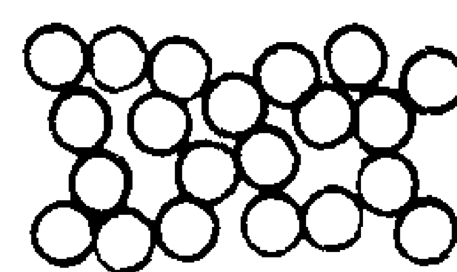
各种物质都是由一些微观粒子聚集而成。由于微观粒子间的距离、排列情况和作用力的差别，呈现出的宏观状态也有所不同，这种宏观状态称为聚集态。常见的固、液、气三种聚集状态。如图 1.1.10-1。

1.1.1 气体

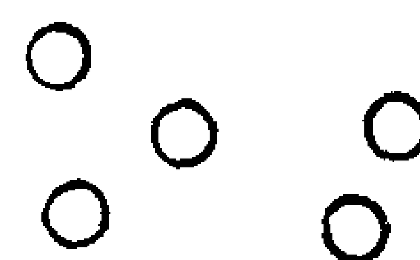
气体可通过测量其压力、体积、和绝对温度来确定其质量。且有 $pV=nR_mT$ 的关系式。



a）晶体



b）液体



c）气体

○分子

图 1.1.10-1 三种聚集状态比较的示意图

a)晶体； b)液体 c)气体

式中：P——气体的压力；

V——气体的体积；

n——摩尔数；

T——绝对温度；

R_m——摩尔气体常数，$R_m=8.315$J/(k · mol)。

工程中常见的为气体混合物。混合气体的总压力等于各组分气体分压力之和，此为道尔顿定律。

1.1.2 固体

固体物质一般可以分为晶体物质与非晶体物质两大类。如表 1.1.10-1

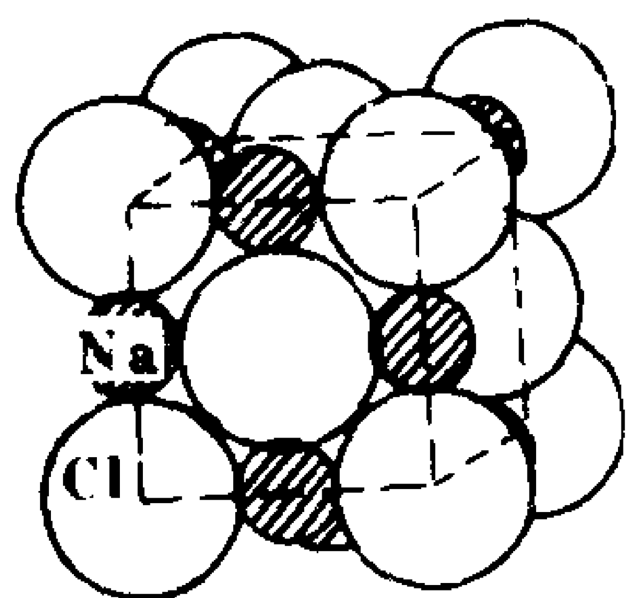
表 1.1.10-1 晶体与非晶体性质

性质	晶体	非晶体
几何外形	有	无
固定熔点	有	无
各向异性	如解理性、光学性质、导热性、导电性	各向同性

组成晶体的微粒是有规则地排列在空间的一定的点上。这些点的总和称晶格或点阵，排有微粒的那些点叫做晶格结点。

晶体按晶格内部微粒间的作用力来划分有离子晶体，如NaCl、原子晶体，如金刚石、分子晶体，如固体CO_2和金属晶体等四种基本类型。此外还有链状结构和层状结构的过渡型晶体。如图 1.1.10-2、图 1.1.10-3、图 1.1.10-4、图 1.1.10-5、图 1.1.10-6、图 1.1.10-7

晶体各类型不同，其性质各异。见表 1.1.10-2



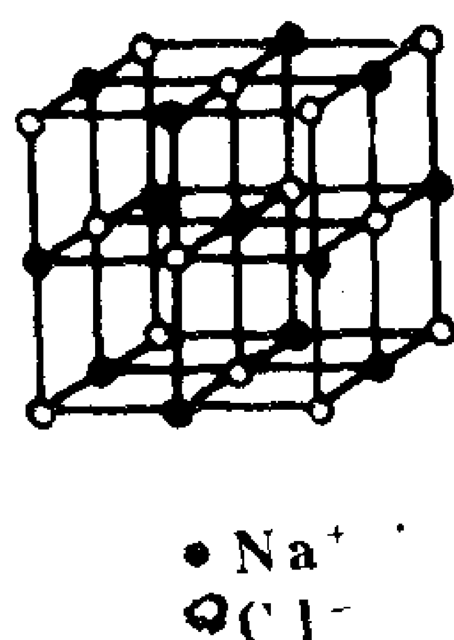


图 1.1.10-2 氯化钠的晶体结构
a)晶体中离子的排列； b)晶格

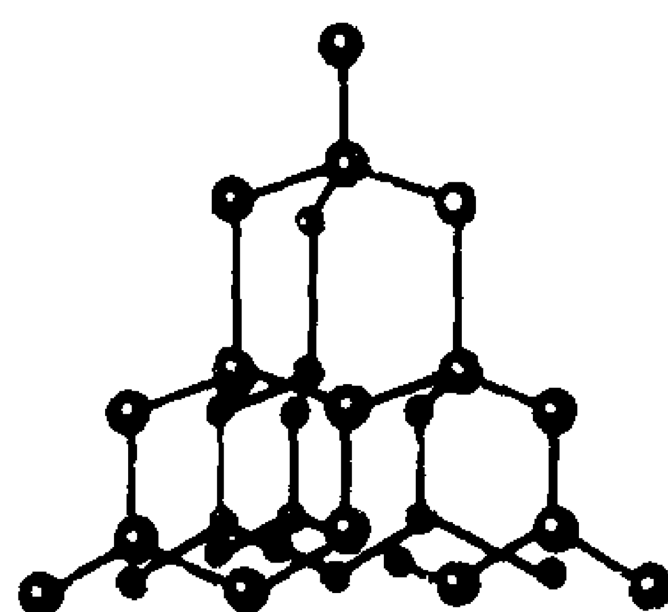


图 1.1.10-3 金刚石的晶体结构

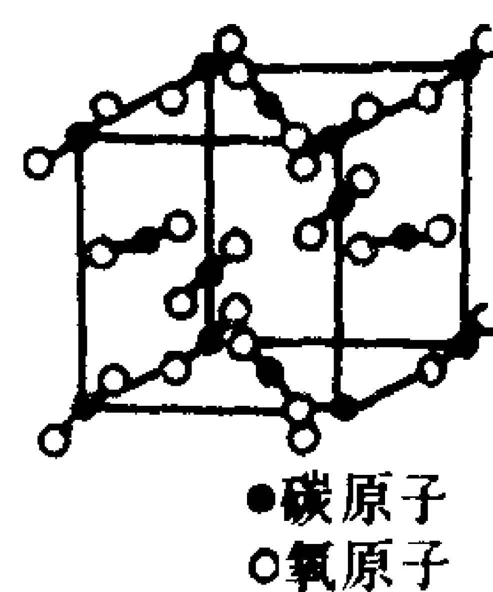


图 1.1.10-4
二氧化碳的晶体结构

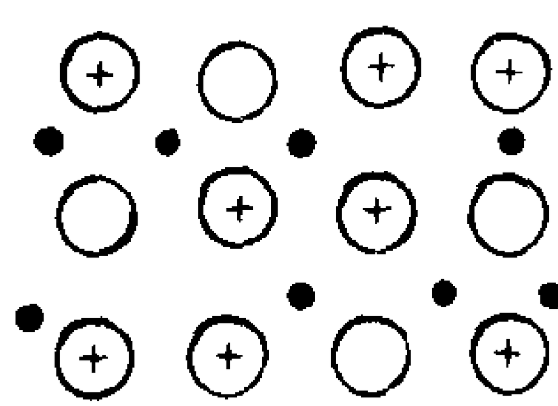


图 1.1.10-5
金属的晶体结构

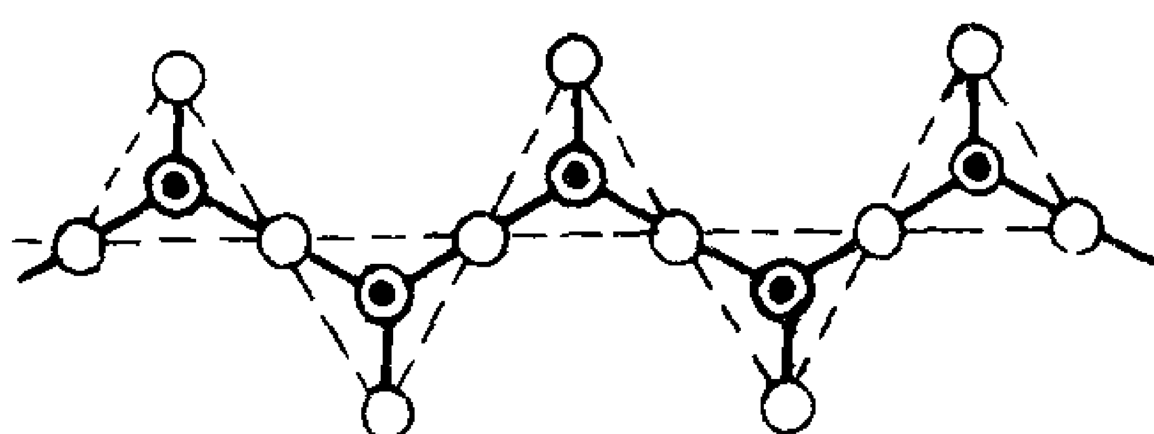


图 1.1.10-6 $(SiO_3)_n^{2n-}$ 的链状结构

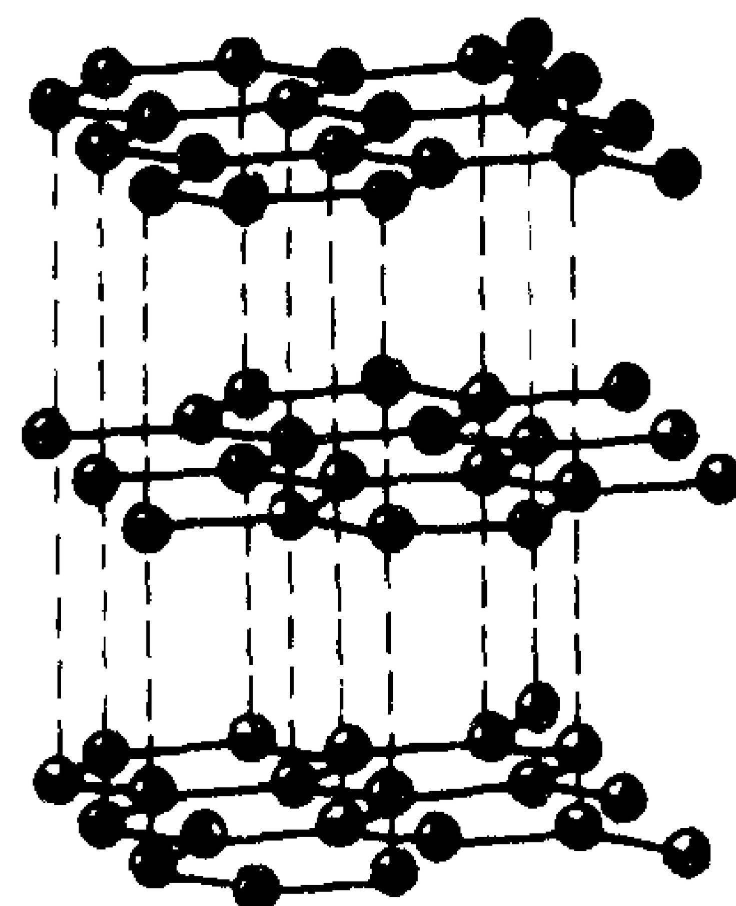


图 1.1.10-7 石墨的层状结构

表 1.1.10-2 晶体的基本类型和性质对比

晶体基本类型	离子晶体	原子晶体	分子晶体	金属晶体
晶体结上的微粒	正、负离子	原子	分子（极性或非极性）	金属原子或离子
微粒间的作用力	离子键	共价键	分子间力（氢键）	金属键
熔点、沸点	较高	高	低	一般较高，部分低
硬度	较大	大	小	一般较大，部分小
延展性	差	差	差	良
导电性	水溶液或熔融态易导电	绝缘体（半导体）	绝缘体	良导体

1.1.3 液体

一种物质在一定的温度和压力下，可以是固态、液态、气态存在，也可以两种状态共存，例如水在常温时，在大气压中，液态水与水蒸汽共存，在某一特定温度压力下还可以三种状态同时共存。

气、液两相达到热动平衡时，气相产生的压力称为该液体在该温度下的饱和蒸汽压。饱和蒸汽压决定于温度和液体的本性。

液体沸腾的温度称沸点。沸点即是液体蒸汽压等于外界压力时的温度。

不同温度时水的饱和蒸汽压见本卷工程热力学表。几种常见液体的饱和蒸汽压与温度的关系见表 1.1.10-3。

表 1.1.10-3　　几种液体的饱和蒸汽压与温度的关系

物质 \ 饱和蒸汽压,kPa / 温度t°C	101.3	202.6	506.6	1013.2	2026.5	4053	6079.5
氨 NH_3	−33.6	−18.7	4.7	25.7	50.1	78.9	93.3
四氯化碳 CCl_4	76.7	102.0	141.7	178.0	222.0	276.0	——
二氧化硫 SO_2	−10.0	−16.3	32.1	55.5	83.8	113.0	141.7
水 H_2O	100.0	120.1	152.4	180.5	213.1	251.5	276.5
乙醇 C_2H_5OH	78.4	97.5	126.0	151.8	183.0	218.0	242.0
苯 C_6H_6	80.1	103.8	142.5	178.8	221.5	272.3	——
甲苯 $C_6H_5CH_3$	110.1	136.5	178.0	215.8	262.5	319.0	——

液体的凝固点就是固相与液相共存的温度，也即固相蒸汽压与液相蒸汽压相等时的温度。不同温度时冰的蒸汽压见表 1.1.10-4。

表 1.1.10-4　　在不同温度时冰的蒸汽压

温　　度（℃）	0	−1	−5	−10	−15	−20	−25
蒸　气　压　（Pa）	610.6	562.6	401.2	259.9	165.3	103.4	63.4

1.2　溶液与胶体

1.2.1　分散系的一般概念

一种或几种物质较细的粒子，分散在另一种物质里所形成的体系称分散系。被分散的物质叫分散质；用以分散分散质的物质称分散剂。各种分散系如表 1.1.10- 5

表 1.1.10-5　　分　散　系

分　散　质	分　散　剂	例
气	液	泡沫
液	液	酒、牛奶
固	液	河水、海水
气	固	浮石、馒头、泡沫塑料
液	固	珍珠
固	固	合金
液	气	雾、云
固	气	烟、尘
气	气	空　气

如果分散质是以分子或离子均匀地分散在分散剂中，形成的是单相体系，这种分散系就是溶液。分散质为溶质，分散剂为溶剂。从分散系的类型可知，溶液不一定都是液态的，也有气态或固态的。其中水溶液为常见的。

如果分散质的粒子是由许多分子或离子聚集而成的，粒子与分散剂之间就有界面存在，组成的分散系就是多相的不均匀体系。这样的分散系称为胶体。自然界的物质 80%都是胶体状态的。

1.2.2　溶液的浓度

一定量的溶液或溶剂中所含溶质的量，称为溶液的浓度。几种常见的浓度如表 1.1.10- 6。

表 1.1.10-6　　几种常见的浓度表示法

名　　称	表　示　法	实　　例	优　　点
百分浓度	浓度的重量占全部溶液重量的百分数。	15%食盐水溶液	简单、方便
体积摩尔浓度	1升溶液中所含溶质的摩尔数 $M=\frac{n(\text{摩尔数})}{V(\text{溶液体积})}$	0.3 M　H_2SO_4溶液	稀释方便
克当量浓度	1升溶液中所含溶质的克当量数，用“N”表示。	0.5 N HCl溶液	计算方便 $N_1V_1=N_2V_2$
百万分之几	溶质占溶液重量的百万分之几，用“PPm”表示	20 PPm的$CaCO_3$溶液	适用于稀溶液

1.2.3　溶液的通性

溶液与纯溶剂相比较，蒸汽压、沸点、凝固点等都要发生变化。这些变化只与溶质的量有关，而与溶质的本性无关。

在同一温度下，难挥发物质的溶液蒸汽压总是低于纯溶剂的蒸汽压。这里溶液的蒸汽压实际上是指溶液中溶剂的蒸汽压。同一温度下，纯溶剂蒸汽压和溶液蒸汽压的差值，称为溶液的蒸汽压下降。与纯溶剂相同，溶液的蒸汽压也是随着温度的增高而增大。

纯溶剂有固定的沸点和凝固点，但当溶质加入溶剂后，溶剂的沸点和凝固点都要发生变化。设外界压力为 101.3 kPa，则水的沸点为 100℃；水的冰点为 0 ℃。当水中溶解了难挥发溶质后，水溶液的蒸汽压要下降ΔP，溶液的温度在 100℃时，还比外压低ΔP，不能产生沸腾现象。只有温度继续升高，当溶液的温度达到t_B时，蒸汽压等于 101.3 kPa，才能沸腾。这样溶液的沸点比纯溶剂沸点上升的温度，称为溶液的沸点上升。可用Δt_B表示。如图 1.1.10-8 所示。

由于溶液的蒸汽压下降，在 0 ℃时溶液的蒸汽压低于冰的蒸汽压，两相不能平衡，只有温度继续下降到t_C时，溶液与冰的蒸汽压才能相等，而溶液中的水才能凝结成冰，此时的温度与 0 ℃相差Δt_C称为溶液的凝固点下降。如图 1.1.10-9 所示。

溶液越浓，溶液蒸汽压下降越多，沸点越高，凝固点越低。

溶液除了蒸汽压下降、沸点上升与凝固点下降三种通性之外，还有一种通性，也取决于溶液的浓度，这就是渗透压。

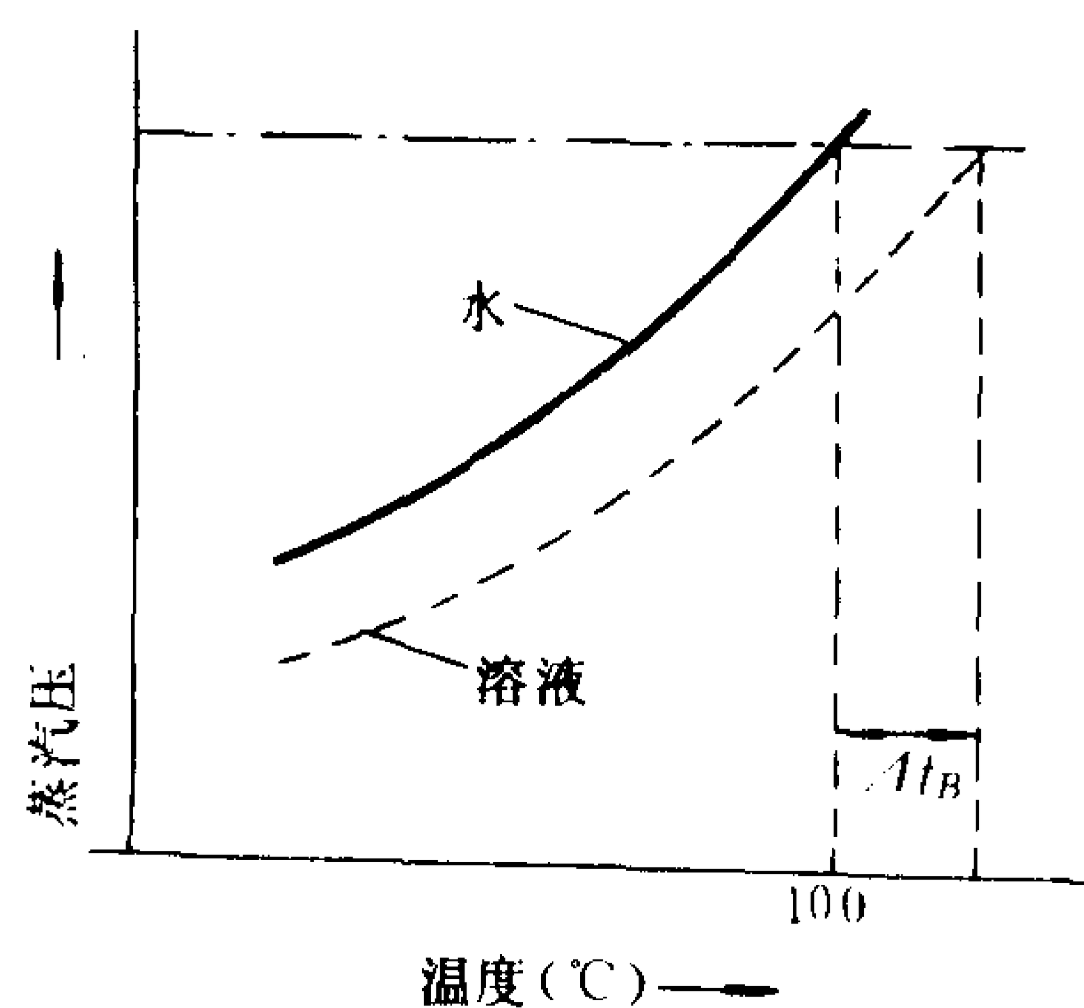


图 1.1.10-8　水溶液的沸点上升

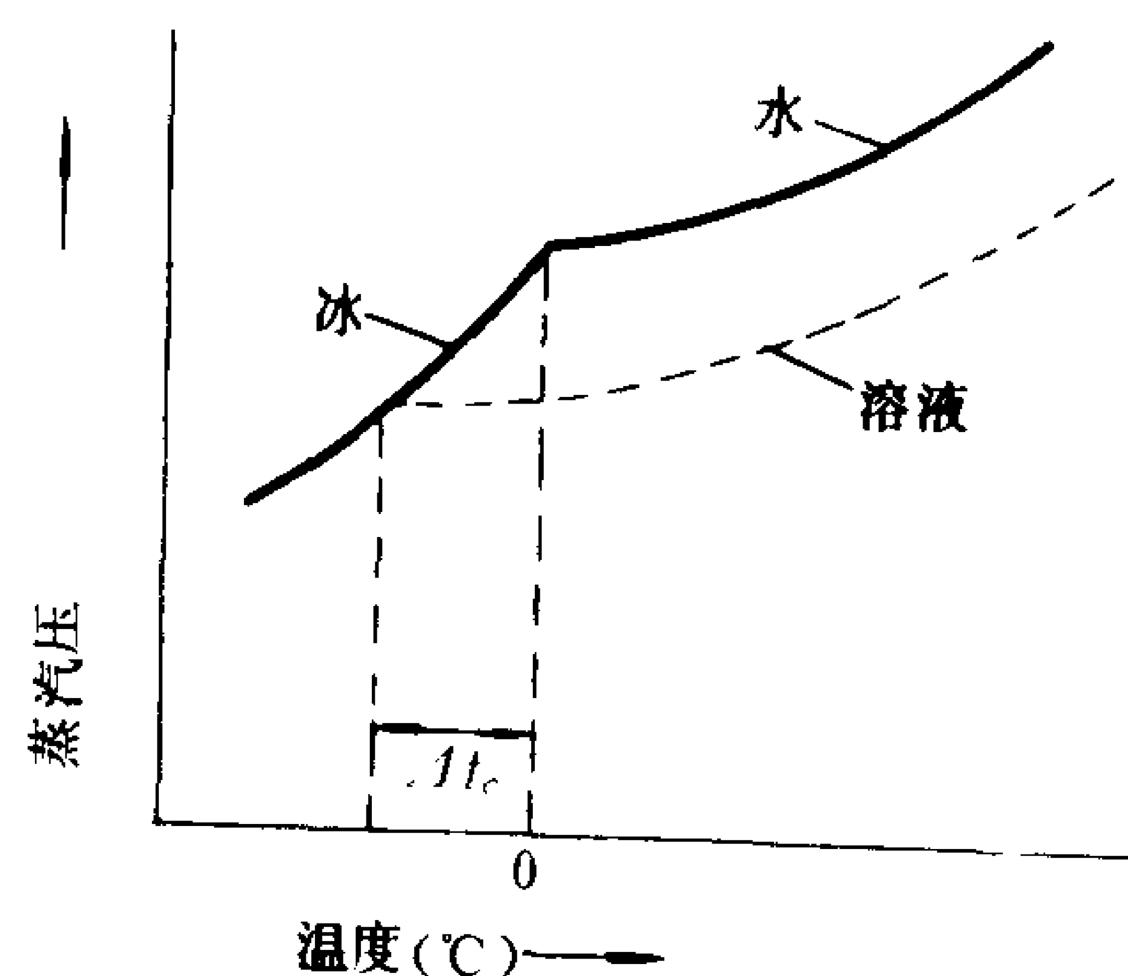


图 1.1.10-9　水溶液的凝固点下降

渗透必须通过一种膜来进行，这种膜上的孔只能允许溶剂的分子通过，而不能允许溶质的分子通过，因此叫做半透膜。如按图 1.1.10-10 的装置用半透膜把溶液和纯溶剂隔开，这种溶剂分子在单位时间内进入溶液内的数目，要比溶液内的溶剂分子在同一时间内进入纯溶剂内的数目为多。从表面上看来，溶剂通过半透膜渗透到溶液中，使得溶液的体积逐渐增大，垂直的细玻璃管中的液面逐渐上升。

若要使膜内溶液与膜外纯溶剂的液面相平，即使溶液的液面不上升，必须在溶液面上增加一定压力，此时单位时间内，溶剂分子从两个相反的方向穿过半透膜的数目彼此相等，即达到渗透平衡。这样，溶液液面上所增加的压力就是这个溶液的渗透压。因此，渗透压就是阻止溶剂通过半透膜流入溶液所施加于溶液的最小的额外压力。

如果外加在溶液上的压力超过了渗透压，则反而使溶液中的溶剂向纯溶剂方向流动，使纯溶剂的体积增加，这个过程称为反渗透，反渗透的原理广泛应用于海水淡化、工业废水处理和溶液的浓缩等方面。

1.2.4 胶体

胶体是非均匀体系。因为胶体中的分散质是分子或离子的聚集体，因此气体与气体不能组合成胶体，分散剂是液体时，分散质的颗粒的直径在 $10^{-9} \sim 10^{-7}$m之间的胶体，其外观与溶液相似，又称为溶胶。分散质颗粒大于 10^{-7}m的胶体浊液。分散剂与分散质都是液体时，其外观与乳汁相似，又称为乳浊液。

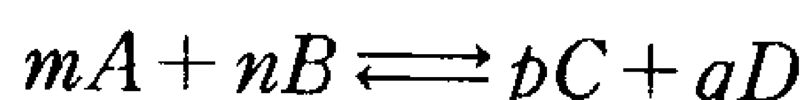
胶体具有丁铎尔效应、吸附现象、电泳现象及具有一定的稳定性等一些重要性质。

1.3 平衡及其移动

1.3.1 化学平衡及平衡常数

反应的可逆性是化学反应的普遍特征。当正、逆两反应的速度相等时，体系所处的状态称为化学平衡。

任何一个可逆反应



$$mA + nB \rightleftharpoons pC + qD$$

在一定温度下达到平衡时，生成物浓度以反应摩尔数为指数的乘积与反应物浓度以反应摩尔数为指数的乘积之比值为一个常数。

$$\frac{[C]^p \cdot [D]^q}{[A]^m \cdot [B]^n} = K_C$$

K_C叫做在该温度下反应的浓度平衡常数。式中〔 〕内为达到平衡时各物质的浓度($mol \cdot l^{-1}$)。若上反应为气相反应，由于一定温度下，气体的压力与浓度成正比；可以换算成以各气体分压P_A、P_B、P_C、P_D表示的分压平衡常数K_P。

$$K_P = \frac{P_C^p \cdot P_D^q}{P_A^m \cdot P_B^N}$$

K_C与K_P的关系为　　$K_P = K_C(R_\mu T)^{(p+q)-(m+n)}$

式中：R_μ——摩尔气体常数；

　　　T——热力学温度。

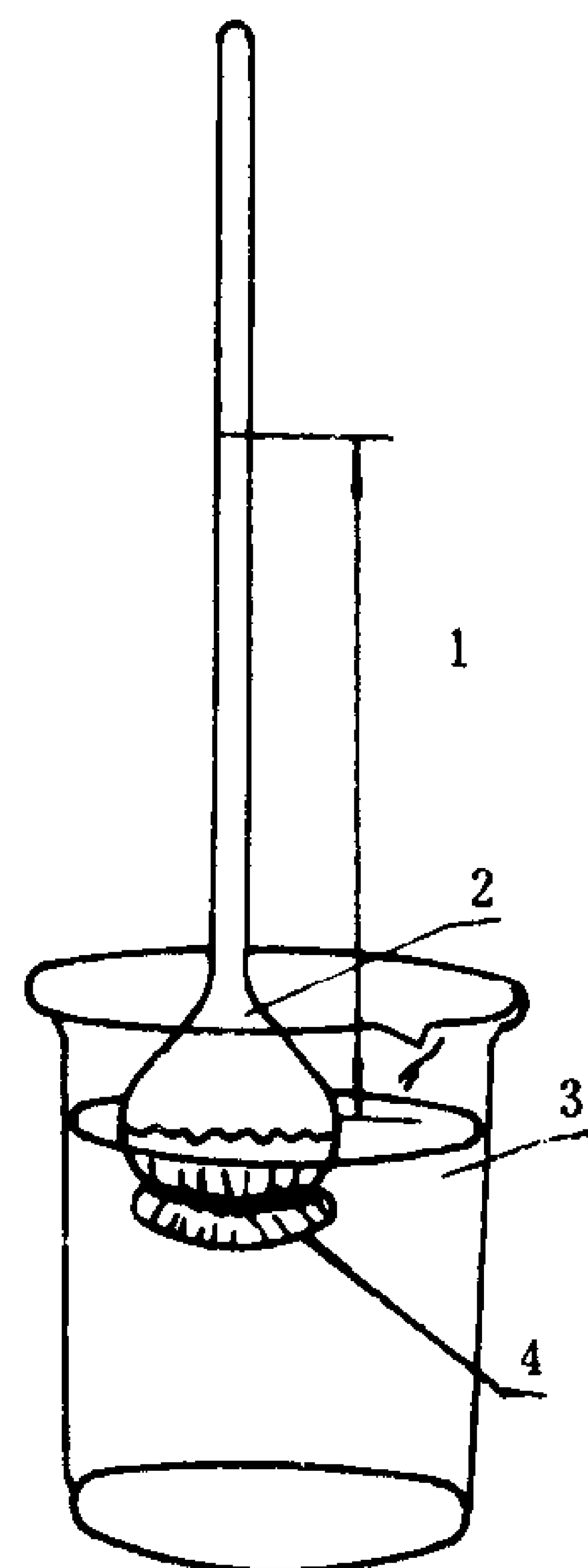


图 1.1.10-10
一个显示渗透现象的简单装置
1-由于渗透压力形成的液面差；2-溶液；3-纯溶剂；4-玻璃纸状半透膜以橡皮圈系于管口

1.3.2 弱电解质的电离平衡常数

对于$AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$弱电解质的电离达到平衡时，其电离常数$K_i$为

$$K_i = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]}$$

为了表示平衡时电离的程度，也可用电离度α表示。

$$电离度\alpha = \frac{已电离的溶质分子数}{溶质分子总数} \times 100\%$$

电离常数K_i与电离度α有一定的关系，$\alpha = \sqrt{\frac{K_i}{C}}$。即溶液的电离度与弱电解质浓度平方根成反比，称为稀释定律。一些常见弱电解质在水溶液中的电离常数见表 1.1.10-7。

表 1.1.10-6　　一些常见弱电解质在水溶液中的电离常数

电解质	电离平衡	温度(℃)	电离常数** K_a或K_b	PK_a或PK_b
醋酸	$HAc \rightleftharpoons H^+ + Ac^-$	25	1.76×10^{-5}	4.75
硼酸	$(H_3BO_3 \equiv) B(OH)_3 + H_2O \rightleftharpoons B(OH)_4^- + H^+$	20	7.3×10^{-10}	9.14
碳酸	$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$	25	$(K_{a1})^* 4.30 \times 10^{-7}$	6.37
	$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}$	25	$(K_{a2})^* 5.61 \times 10^{-11}$	10.25
氢氰酸	$HCN \rightleftharpoons H^+ + CN^-$	25	4.93×10^{-10}	9.31
氢硫酸	$H_2S \rightleftharpoons H^+ + HS^-$	18	$(K_{a1}) 9.1 \times 10^{-8}$	7.04
	$HS^- \rightleftharpoons H^+ + S^{2-}$	18	$(K_{a2}) 1.1 \times 10^{-12}$	11.96
草酸	$H_2C_2O_4 \rightleftharpoons H^+ + HC_2O_4^-$	25	$(K_{a1}) 5.90 \times 10^{-2}$	1.23
	$HC_2O_4^- \rightleftharpoons H^+ + C_2O_4^{2-}$	25	$(K_{a2}) 6.40 \times 10^{-5}$	4.19
蚁酸	$HCOOH \rightleftharpoons H^+ + HCOO^-$	20	1.77×10^{-4}	3.75
磷酸	$H_3PO_4 \rightleftharpoons H^+ + H_2PO_4^-$	25	$(K_{a1})\ 7.52 \times 10^{-3}$	2.12
	$H_2PO_4^- \rightleftharpoons H^+ + HPO_4^{2-}$	25	$(K_{a2}) 6.23 \times 10^{-8}$	7.21
	$HPO_4^{2-} \rightleftharpoons H^+ + PO_4^{3-}$	25	$(K_{a2}) 4.4 \times 10^{-13}$	12.36
亚硫酸	$H_2SO_3 \rightleftharpoons H^+ + HSO_3^-$	18	$(K_{a1}) 1.54 \times 10^{-2}$	1.81
	$HSO_3^- \rightleftharpoons H^+ + SO_3^{2-}$	18	$(K_{a2}) 1.02 \times 10^{-7}$	6.91
亚硝酸	$HNO_2 \rightleftharpoons H^+ + NO_2^-$	12.5	4.6×10^{-4}	3.37
氢氟酸	$HF \rightleftharpoons H^+ + F^-$	25	3.53×10^{-4}	3.45
硅酸	$H_2SiO_3 \rightleftharpoons H^+ + HSiO_3^-$	(常温)	$(K_{a1}) 2 \times 10^{-10}$	9.70
	$HSiO_3^- \rightleftharpoons H^+ + SiO_3^{2-}$	(常温)	$(K_{a2}) 1 \times 10^{-12}$	12.00
氨水	$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$	25	1.79×10^{-5}	4.75

* K_{a1}、K_{a2}分别表示一级电离和二级电离的电离常数。

** 数据主要录自 Robert C. Weast, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 58thed., 1977~78, D-149~151。

1.3.3 同离子效应与缓冲溶液

在弱电解质溶液中，加入与弱电解质具有相同离子的强电解质时，可使弱电解质的电离度降低，这种现象称为同离子效应。

弱酸及弱酸盐（或弱碱及弱碱盐）的混和溶液的pH值能在一定范围内不因稀释或外加少量酸或碱而发生显著变化，这种溶液称为缓冲溶液。一些常用缓冲溶液的配制如表 1.1.10-8。

表 1.1.10-8　　一些缓冲溶液的配制

pH 值	配制方法
4.0	20 克$NaAc\cdot 3H_2O$溶于适量水中，加 134 毫升$6M\ HA_C$，稀释到 500 毫升
5.0	50 克$NaAc\cdot 3H_2O$溶于适量水中，加 34 毫升$6M\ HA_C$，稀释到 500 毫升
7.0	77 克NH_4A_C溶于适量水中，稀释到 500 毫升
8.0	50 克NH_4Cl溶于适量水中，加 3.5 毫升$15M$氨的水溶液，稀释到 500 毫升
9.0	35 克NH_4Cl溶于适量水中，加 24 毫升 $15M$氨的水溶液，稀释到 500 毫升
10.0	27 克NH_4Cl溶于适量水中，加 197 毫升 $15M$氨的水溶液，稀释到 500 毫升
11.0	3 克NH_4Cl溶于适量水中，加 207 毫升 $15M$氨的水溶液，稀释到 500 毫升

溶液的酸碱性和pH值的大概范围，可使用酸碱指示剂测定。几种常用的酸碱指示剂如表 1.1.10-9。

表 1.1.10-9　　几种常用的酸碱指示剂

指示剂	变色范围（pH值）	颜色	
		酸色	碱色
百里酚蓝	1.2～2.8	红	黄
甲基黄	2.9～4.0	红	黄
甲基橙	3.1～4.4	红	黄
溴酚蓝	3.0～4.6	黄	紫
甲基红	4.4～6.2	红	黄
石蕊	5.0～8.0	红	蓝
溴百里酚蓝	6.2～7.6	黄	蓝
中性红	6.8～8.0	红	黄橙
甲酚红	7.2～8.8	黄	红
酚酞	8.0～10.0	无	红
百里酚酞	9.4～10.6	无	蓝
茜素黄	10.1～12.0	黄	红

1.3.4 多相离子平衡

难溶电解质的饱和溶液中，当温度一定时，其离子浓度的乘积为一常数。称为溶度积以K_{SP}表示。对于　$A_nB_m \rightleftharpoons nA^{m+} + mB^{n-}$

$$K_{SP} = [A^{m+}]^n[B^{n-}]^m$$

溶度积的大小与物质的溶解度有关。利用溶度积规则，可以进行沉淀与溶解的相互转化。还可以利用溶度积的差异，适当控制条件(如控制pH值)，达到分离离子的目的等。一些常见物质的溶度积如表 1.1.10-10。

表 1.1.10-10　　一些常见物质的溶度积*

难溶物质	分子式	温度（℃）	溶度积
氯化银	$AgCl$	25	1.56×10^{-10}
溴化银	$AgBr$	25	7.7×10^{-13}
碘化银	AgI	25	1.5×10^{-16}
氢氧化银	$AgOH$	20	1.52×10^{-8}
铬酸银	Ag_2CrO_4	14.8	1.2×10^{-12}

续上表

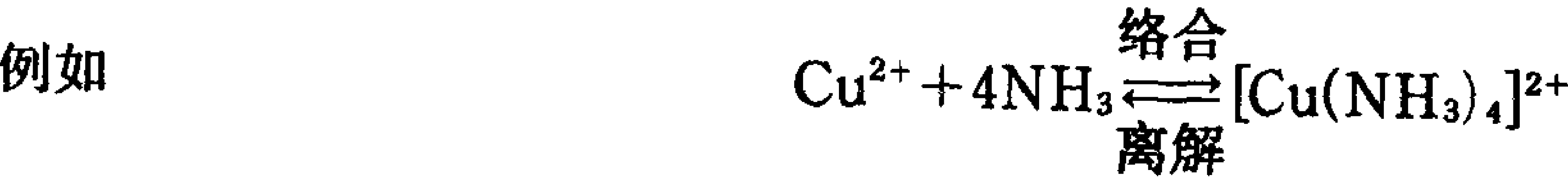
难溶物质	分子式	温度(℃)	溶度积
		25	9×10^{-12}
硫化银	Ag_2S	18	1.6×10^{-49}
硫酸钡	$BaSO_4$	25	1.08×10^{-10}
碳酸钡	$BaCO_3$	25	8.1×10^{-9}
铬酸钡	$BaCrO_4$	18	1.6×10^{-10}
碳酸钙	$CaCO_3$	25	8.7×10^{-9}
硫酸钙	$CaSO_4$	25	2.45×10^{-5}
磷酸钙	$Ca_3(PO_4)_2$	25	2.0×10^{-29}
氢氧化铜	$Cu(OH)_2$	25	5.6×10^{-20}
硫化铜	CuS	18	8.5×10^{-45}
氢氧化铁	$Fe(OH)_3$	18	1.1×10^{-36}
氢氧化亚铁	$Fe(OH)_2$	18	1.64×10^{-14}
硫化亚铁	FeS	18	3.7×10^{-19}
碳酸镁	$MgCO_3$	12	2.6×10^{-5}
氢氧化镁	$Mg(OH)_2$	18	1.2×10^{-11}
二氢氧化锰	$Mn(OH)_2$	18	4.0×10^{-14}
硫化锰	MnS	18	1.4×10^{-15}
硫酸铅	$PbSO_4$	18	1.06×10^{-8}
硫化铅	PbS	18	3.4×10^{-28}
碘化铅	PbI_2	25	1.39×10^{-8}
碳酸铅	$PbCO_3$	18	3.3×10^{-14}
铬酸铅	$PbCrO_4$	18	1.77×10^{-14}
碳酸锌	$ZnCO_3$	18	1.0×10^{-10}
硫化锌	ZnS	18	1.2×10^{-23}
硫化镉	CdS	18	3.6×10^{-29}
硫化钴	CoS	18	3×10^{-26}
硫化汞	HgS	18	$4\times10^{-53}\sim2\times10^{-49}$

* 数据主要录自 Robert C. Weast, CRC Handbook of Chemistry and Physics 58thed., 1977~78, B-254。

1.3.5 络合平衡

配位离子（或分子）中，是以配位键把中心离子和配位体结合在一起的，配位离子在水溶液中的基本特征是存在着络合平衡。

例如



$$Cu^{2+}+4NH_3\underset{\text{离解}}{\overset{\text{络合}}{\rightleftharpoons}}[Cu(NH_3)_4]^{2+}$$

$$K_s=\frac{[Cu(NH_3)_4]^{2+}}{[Cu^{2+}][NH_3]^4}$$

K_s称为稳定常数。K_s越大，配位离子越稳定。有时也用不稳定常数K_{ns}表示。在相同条件下，$K_s=\frac{1}{K_{ns}}$。一些配位离子的稳定常数如表 1.1.10-11。

表 1.1.10-11　　配位离子的稳定常数

络离子	K_s	$\lg K_s^*$	络离子	K_s	$\lg K_s^*$
$[Ag(CN)_2]^-$	1.26×10^{21}	21.1	$[Cu(P_2O_7)_2]^{6-}$	1×10^{9}	9.0
$[Ag(NH_3)_2]^+$	1.12×10^{7}	7.05	$[FeF_6]^{3-}$	2.04×10^{14}	14.31
$[Ag(S_2O_3)_2]^{3-}$	2.89×10^{13}	13.46	$[Fe(CN)_6]^{3-}$	1×10^{42}	42
$[AgCl_2]^-$	1.10×10^{5}	5.04	$[Hg(CN)_4]^{2-}$	2.51×10^{41}	41.4

续上表

络 离 子	K_s	$\lg K_s^*$	络 离 子	K_s	$\lg K_s^*$
$[AgBr_2]^-$	2.14×10^{7}	7.33	$[HgI_4]^{2-}$	6.76×10^{29}	29.83
$[AgI_2]^-$	5.5×10^{11}	11.74	$[HgBr_4]^{2-}$	1×10^{21}	21.00
$[Ag(py)_2]^+$	1×10^{10}	10.0	$[HgCl_4]^{2-}$	1.17×10^{15}	15.07
$[Co(NH_3)_6]^{2+}$	1.29×10^{5}	5.11	$[Ni(NH_3)_6]^{2+}$	5.50×10^{8}	8.74
$[Cu(CN)_2]^-$	1×10^{24}	24.0	$[Ni(en)_3]^{2+}$	2.14×10^{18}	18.33
$[Cu(SCN)_2]^-$	1.52×10^{5}	5.18	$[Zn(CN)_4]^{2-}$	5.0×10^{16}	16.7
$[Cu(NH_3)_2]^+$	7.24×10^{10}	10.86	$[Zn(NH_3)_4]^{2+}$	2.87×10^{9}	9.46
$[Cu(NH_3)_4]^{2+}$	2.09×10^{13}	13.32	$[Zn(en)_2]^{2+}$	6.76×10^{10}	10.83

* 数据录自 J. A. Dean, Lange's Handbook of Chemistry, Tab. 5～14, Tab. 5～15, 11th ed., 1973; 温度一般为 20～25℃; K_s值系由$\lg K_s$值换算的。

1.4 化学热力学基础知识

1.4.1 基本概念

1)体系与外界

任何物质总是和它周围的其它物质相联系的，为了科学研究的需要，把被研究的对象称为体系。与体系有相互作用的周围物质称为外界。

2)热效应

化学反应中，当生成物的温度与反应物的温度相同，并且在反应过程中只作体积功不做其它功时，化学反应所吸收或放出的热量，称为此过程的热效应。

3)自发过程

在给定条件下能自动进行的过程，称为自发过程。

4)状态与状态参数

状态就是体系的物理性质和化学性质的总和。当体系这些性质都有确定值时，就说体系处于一定的状态。

体系状态的性质随状态而定，当状态改变它也随之改变；这些用来描述体系的性质，仅决定于状态的本身而与变化途径无关，称为状态参数。

1.4.2 焓——状态参数

焓的定义式$H=U+PV$

式中：U——内能；

P——压力；

V——体积；

H——焓。

恒压只作体积功时，化学反应体系的焓变等于热效应值。即$\Delta H=Q_P$。

在化学热力学中，称体系内各物质都处于一大气压下的状态为标准状态。通常还选定 298 K时的标准状态，由处于稳定状态的单质生成 1 摩尔纯物质时反应的焓变为该物质的标准生成焓。以符号$\Delta H_{f298}^{\ominus}$表示。并规定稳定单质的标准生成焓为零。

任何反应如$mA+nB=pC+qD$在 1 大气压和298K时，反应的标准焓变可按下式求得。

$$\Delta H_{298}^{\ominus}=\{p\Delta H_{f298(C)}^{0}+q\Delta H_{298(D)}^{\ominus}\}-\{m\Delta H_{f298(A)}^{\ominus}+n\Delta H_{298(B)}^{\ominus}\}$$

一大气压下，任意温度下的焓变近似等于标准焓变。

1.4.3 熵

熵是描述体系混乱度的量度。是体系的状态参数。1912 年普朗克提出：完整无缺的晶体在绝对零度时是最有序的，其绝对熵为零。通常把一大气压下，一摩尔某物质的熵称为该物质的标准熵。以符号$S^{\ominus}$表示，其单位$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$。

任意反应$mA+nB=pC+qD$，在 298 K时，该反应的标准熵变为

$$\Delta S_{298}^{\ominus}=\{pS_{298(C)}+qS_{298(D)}\}-\{mS_{298(A)}^{\ominus}+nS_{298(B)}^{\ominus}\}$$

一大气压下，任意温度的熵变，近似等于 298 K时的熵变。

1.4.4 自由焓

自由焓定义式$G=H-TS$。是状态参数。规定 1 大气压及 298 K时，由处于稳定状态的单质生成 1 摩尔纯物质时，其反应的自由焓变称为该物质的标准生成自由焓。以符号ΔG_{f298}表示。对于$mA+nB=pC+qD$的反应，在标准状态下，298 K时的自由焓变为：

$$\Delta G_{298}^{\ominus}=\{p\Delta G_{f298(C)}^{\ominus}+q\Delta G_{f298(D)}^{\ominus}\}-\{m\Delta G_{f298(A)}^{\ominus}+n\Delta G_{f298(B)}^{\ominus}\}$$

或

$$\Delta G_{298}^{\ominus}=\Delta H_{298}^{\ominus}-298\Delta S_{298}^{\ominus}$$

若为 1 大气压，任意温度T时的自由焓变则为

$$\Delta G_{T}^{\ominus}=\Delta H_{T}^{\ominus}-T\Delta S_{T}^{\ominus}$$

$$\cong\Delta H_{298}^{\ominus}-T\Delta S_{298}$$

用$\Delta G^{\ominus}$可以判断反应进行的方向

$\Delta G^{\ominus}<0$　自发过程

$\Delta G^{\ominus}=0$　平衡状态

$\Delta G^{\ominus}>0$　非自发过程

自由焓变与化学平衡常数的关系式为

$$\lg K_{P}=\frac{-\Delta G^{0}}{2.303RT}$$

一些物质的标准生成焓、标准生成自由焓及标准熵如表 1.1.10-12。一些水合离子的标准生成焓、标准生成自由焓和标准熵如表 1.1.10-13。

表 1.1.10-12　一些物质的标准生成焓、标准生成自由焓和标准熵的数据*

物　　质	$\Delta H_{f298}^{\ominus}$ KJ/mol	$\Delta G_{f298}^{\ominus}$ KJ/mol	$S_{298}^{\ominus}$ J/(mol·K)
Ag（固）	0	0	42.72
AgCl（固）	−127.0	−109.7	96.11
AgI（固）	−62.38	−66.32	114
Al（固）	0	0	28.3
$AlCl_3$（固）	−695.4	−636.8	167
Cu（固）	0	0	33.3
CuO（固）	−155	−127	43.5
Cu_2O（固）	−166.7	−146.4	101
F_2（气）	0	0	203
Fe（固）	0	0	27.2
FeO（固）	−267	−244	59.4
Fe_2O_3（固，赤铁矿）	−822.2	−741.0	90.0
Fe_3O_4（固，磁铁矿）	−1117	−1014	146
H_2（气）	0	0	130.6
HCl（气）	−92.30	−95.27	186.7

续上表

物　　质	$\Delta H_{f298}^{\ominus}$	$\Delta G_{f298}^{\ominus}$	$S_{298}^{\ominus}$
	KJ/mol	KJ/mol	J/（mol·K）
HF（气）	−269	−271	173.5
H_2O（气）	−241.8	−228.6	188.7
（液）	−285.9	−237.2	69.96
H_2S（气）	−20.15	−33.02	205.6
N_2（气）	0	0	191.5
NH_3（气）	−46.19	−16.64	192.5
NH_4Cl（固）	−315.4	−203.9	94.6
NO（气）	90.37	86.69	210.6
NO_2(气)	33.9	51.84	240.5
CH_4（气）	−74.848	−50.794	186.2
C_2H_2（气）	226.75	209.20	200.82
C_2H_4（气）	52.283	68.124	219.5
C_2H_6（气）	−84.667	−32.89	229.5
C_6H_6（气）	82.927	129.66	269.2
（液）	49.036	124.14	173.26
C_2H_5OH（液）	−277.63	−174.8	161

* 本表所列数据，均录自 Robert C. Weast, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 58th ed., 1977~78, D-67~79, D-82~84。

表 1.1.10-13　　一些水合离子的标准生成焓、标准生成自由焓和标准熵的数据*

水 合 离 子	$\Delta H_{f298}^{\ominus}$	$\Delta G_{f298}^{\ominus}$	$S_{298}^{\ominus}$
	KJ/mol	KJ/mol	(J/mol·K)
H^+	0.00	0.00	0.00
Na^+	−239.6	−261.9	60.4
K^+	−251.2	−282.28	103
Ag^+	105.9	77.11	73.92
NH_4^+	−132.8	−79.50	113.8
Ba^{2+}	−538.39	−560.7	12.6
Ca^{2+}	−542.96	−555.7	−55.2
Mg^{2+}	−461.96	−456.03	−118
Fe^{2+}	−87.9	−84.94	−113
Fe^{3+}	−47.7	−10.5	−293
Cu^{2+}	64.37	65.10	−98.7
Zn^{2+}	−152.4	−147.21	−106.5
Pb^{2+}	1.6	−24.3	21
Mn^{2+}	−219	−223	−83.7
OH^-	−230.0	−157.3	−10.7
F^-	−328.2	276.5	−9.6
Cl^-	−167.4	−131.1	55.11
Br^-	−120.9	−102.8	80.71
I^-	−55.94	−52.57	108.4
HS^-	−17.7	12.6	61.1
HCO_3^-	−691.11	−588.06	95.0
S^{2-}	42	84	22
SO_4^{2-}	−907.61	−742.01	17
CO_3^{2-}	−676.26	−528.10	−63.1

1.5 化学反应速度

1.5.1 表示法

化学反应速度是用单位时间内反应物浓度的减少或生成物浓度的增加来表示。为了简便常用平均速度。

$$V=\frac{\text{浓度的变化}\ (\mathrm{mol}\cdot \mathrm{l}^{-1})}{\text{变化所需时间}\ (\mathrm{s})}$$

1.5.2 影响因素

在温度一定时，反应速度与各反应物浓度乘方的积成正比，反应物浓度的方次等于化学反应式中相应反应物的摩尔数。对于一步完成的基元反应如 $mA+nB=pC+qD$，其质量作用表达式为

$$V=k[A]^m[B]^n$$

式中：V——反应速度；

k——反应速度常数；

m、n——反应级数。

通常温度升高，反应速度加大；催化剂可以降低活化能，从而增加反应速度。反应速度常数随温度升高或活化能减小而加大，不随浓度而变。

1.6 电化学基础知识

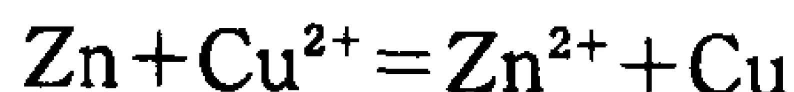
1.6.1 原电池

借助于氧化还原反应，将化学能变成电能的装置称为原电池。如铜一锌原电池，规定电子流出的一极称原电池的负极；电子流入的一极称原电池的正极。在负极发生氧化反应，在正极发生还原反应。

负极　　$Zn=Zn^{2+}+2e$

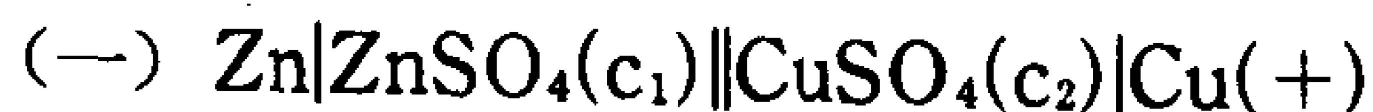
正极　　$Cu^{2+}+2e=Cu$

在两极发生的氧化还原反应，统称为电极反应，电池中发生的总反应称为电池反应。



$$Zn+Cu^{2+}=Zn^{2+}+Cu$$

铜锌原电池的电池符号为



$$(-)\ Zn|ZnSO_4(c_1)\|CuSO_4(c_2)|Cu(+)$$

其中“|”表示两相间的界面，“‖”表示盐桥；c_1、c_2表示溶液的摩尔浓度。

1.6.2 电极电位

同一元素的氧化态与还原态之间的电位，称为该元素的电极电位。电极电位的大小，主要取决于物质的本性，还与温度、浓度等因素有关。规定温度 25℃，组成电极的有关离子浓度为 $1\ \mathrm{mol}\cdot \mathrm{l}^{-1}$，有关气体的分压为标准大气压，若有固、液体均为纯态时，所测得的电极电位称为标准电极电位。以φ°表示。

原电池的电动势与自由焓变的关系为

$$\Delta G=-nEF$$

$$\Delta G^{\ominus}=-nE^0F$$

式中：n——得失电子的摩尔数；

F——法拉弟常数；

E——原电池的电动势；

$E^{\ominus}$——标准电动势。

半电池的电极电位与自由焓变的关系为

$$\Delta G = -nF\varphi$$

$$\Delta G^{\ominus} = -nF\varphi^{0}$$

对于任意一个电极反应



$$a[\text{氧化态}] + K[\text{介质}] + ne \rightleftharpoons c[\text{还原态}] + m[\text{其它产物}]$$

则有 $$\varphi = \varphi^{0} + \frac{0.059}{n}\lg\frac{[\text{氧化态}]^{a}[\text{介质}]^{k}}{[\text{还原态}]^{c}[\text{其它}]^{m}}$$

$$E = \frac{0.059}{n}\lg\frac{[\text{反应物}]}{[\text{生成物}]}$$

可利用上能斯特方程计算不同浓度时的电极电位和电动势。

电极电位是化学中很重要的数据，它可以判断氧化剂与还原剂的相对强弱；进行的方向；进行的程度；确定溶液的pH值等。一些标准电极电位值如表 1.1.10-14。

表 1.1.10-14　　**标 准 电 极 电 位***

电　对 （氧化态/还原态）	电 极 反 应 （氧化态 + $ne \rightleftharpoons$ 还原态）	电 极 电 位 （伏）
Li^{+}/Li	$Li^{+} + e \rightleftharpoons Li$	−3.045
K^{+}/K	$K^{+} + e \rightleftharpoons K$	−2.924
Ca^{2+}/Ca	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	−2.76
Na^{+}/Na	$Na^{+} + e \rightleftharpoons Na$	−2.7109
Mg^{2+}/Mg	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	−2.375
Al^{3+}/Al	$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$(0.1MNaOH)	−1.706
Mn^{2+}/Mn	$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	−1.029
Zn^{2+}/Zn	$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	−0.7628
Fe^{2+}/Fe	$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	−0.409
Cd^{2+}/Cd	$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	−0.4026
Co^{2+}/Co	$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$	−0.28
Ni^{2+}/Ni	$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	−0.23
Sn^{2+}/Sn	$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	−0.1364
Pb^{2+}/Pb	$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	−0.1263
H^{+}/H_2	$H^{+} + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2$	0.0000
$S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}$	$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	+0.09
S/H_2S	$S + 2H^{+} + 2e = H_2S$(水溶液)	+0.141
Sn^{4+}/Sn^{2+}	$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	+0.15
SO_4^{2-}/H_2SO_3	$SO_4^{2-} + 4H^{+} + 2e \rightleftharpoons H_2SO_3 + H_2O$	+0.20
Hg_2Cl_2/Hg	$Hg_2Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^{-}$	+0.2682
Cu^{2+}/Cu	$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	+0.3402
O_2/OH^{-}	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e \rightleftharpoons 2OH^{-}$	+0.401
Cu^{+}/Cu	$Cu^{+} + e \rightleftharpoons Cu$	+0.522
I_2/I^{-}	$I_2 + 2e \rightleftharpoons 2I^{-}$	+0.535
O_2/H_2O_2	$O_2 + 2H^{+} + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	+0.682
Fe^{3+}/Fe^{2+}	$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0.770
Hg_2^{2+}/Hg	$\frac{1}{2}Hg_2^{2+} + e \rightleftharpoons Hg$	+0.7986
Ag^{+}/Ag	$Ag^{+} + e \rightleftharpoons Ag$	+0.7996
Hg^{2+}/Hg	$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	+0.851
NO_3/NO	$NO_3^{-} + 4H^{+} + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	+0.96
HNO_2/NO	$HNO_2 + H^{+} + e \rightleftharpoons NO + H_2O$	+0.99

续上表

电对（氧化态/还原态）	电极反应（氧化态 + $ne \rightleftharpoons$ 还原态）	电极电位（伏）
Br_2/Br^-	$Br_2 + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	+1.065
MnO_2/Mn^{2+}	$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	+1.208
O_2/H_2O	$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	+1.229
$Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}$	$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1.33
Cl_2/Cl^-	$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	+1.3583
MnO_4^-/Mn^{2+}	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	+1.491
H_2O_2/H_2O	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	+1.776
$S_2O_8^{2-}/SO_4^{2-}$	$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	+2.0
F_2/F^-	$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	+2.87

* 数据录自 Robert C. Weast, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 58th ed., 1977~78, D-141~143。

2 有机化学

2.1 概述

有机化合物就是含碳化合物。有机化学就是研究碳氢化合物及其衍生物的化学。有机化合物分子中原子间一般是以共价键连接的，普遍存在着同分异构现象。有机化合物与无机化合物相比较熔点低、挥发性强、容易燃烧、难溶于水、不导电、反应速度慢且反应产物复杂。

2.2 有机化合物分类

2.2.1 按碳链分类

按碳链分
- 开链化合物（脂肪族化合物）
- 碳环化合物
  - 脂环化合物
  - 芳香族化合物
  - 杂环化合物

2.2.2 按官能团分类

按官能团分类如表 1.1.10-15 有机化合物的某些类别。

表 1.1.10-15　有机化合物的某些类别

有机化合物类别	官能团		实例	
名称	式子	名称	结构式	名称
烯烃	$>C=C<$	双键	$CH_2=CH-CH=CH_2$	丁二烯1,3
炔烃	$-C\equiv C-$	叁键	$CH\equiv CH$	乙炔
卤化烃	−X(F. Cl. Br. I)	卤素	$CHCl_3$	三氯甲烷
醇、酚（羟基连在脂肪烃上或芳香环上）	−OH	羟基	CH_3CH_2OH、C_6H_5OH	乙醇、苯酚
醚	$-C-O-C-$	醚链	$C_2H_5OC_2H_5$	乙醚
醛	$-CHO$	醛基	CH_3CHO	乙醛
酮	$>C=O$	羰基	CH_3COCH_3	丙酮
羧酸	$-COOH$	羧基	CH_3COOH、C_6H_5COOH	乙酸、苯甲酸
酯（有机酸酯）	$-COOR'$	酯基	$CH_3COOC_2H_5$	乙酸乙酯
胺	$-NH_2$	胺基	$CH_3CH_2NH_2$	乙胺
腈	$-CN$	氰基	$CH_2=CH-CN$	丙烯腈

续上表

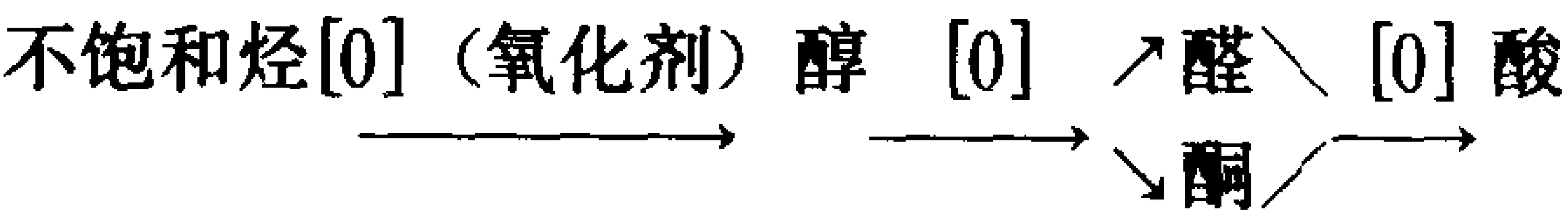
有机化合物类别	官能团		实例	
名称	式子	名称	结构式	名称
磺酸	$-SO_3H$	磺酸基	⬡ SO_3	苯磺酸
硫醇	$-SH$	硫基	CH_3CH_2SH	乙硫醇
硫醚	$-\rangle C-S-C\langle-$	硫醚基	$C_2H_5SC_2H_5$	乙硫醚

2.3 主要反应类型

2.3.1 氧化反应

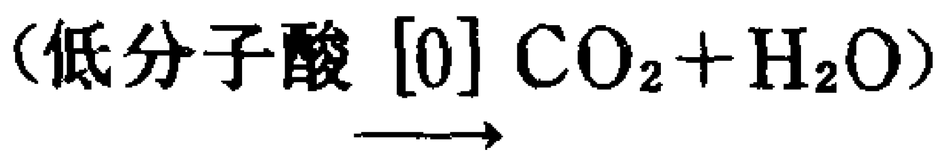
有机化学的氧化反应是指与氧化合或失去氢的反应，在氧气（或空气）中的燃烧反应都是氧化反应。常温下氧化反应较慢，要用催化剂。不饱和烃较饱和烃易氧化。一般规律为

不饱和烃[0]（氧化剂）醇 [0] ↗醛↘ [0] 酸



↘酮↗

（低分子酸 [0] CO_2+H_2O）



2.3.2 取代反应

反应物的氢原子被其它原子或原子团代替的反应称为取代反应。

2.3.3 加成反应

不饱和键（$\rangle C=C\langle$、$-C\equiv C-$、$\rangle C=0$ 等）及不稳定环（$\rangle C=C\langle$ 经 O 成环）碳键断裂，与其它的原子或原子团连接，生成较大分子的反应称为加成反应。共轭双键一般发生 1、4 加成反应。

2.4 有机高分子化合物

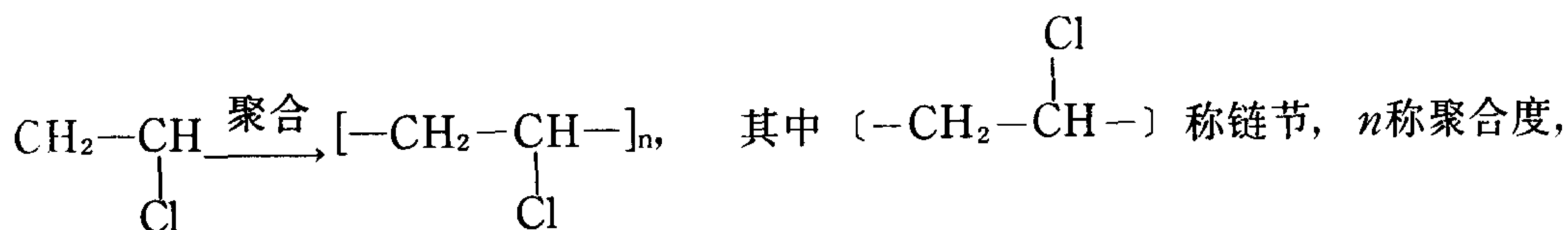
2.4.1 概述

有机高分子化合物简称高聚物，它与低分子化合物的根本区别在于分子量高，如表 1.1.10-16 几种化合物的分子量对比

表 1.1.10-16　　几种化合物的分子量对比

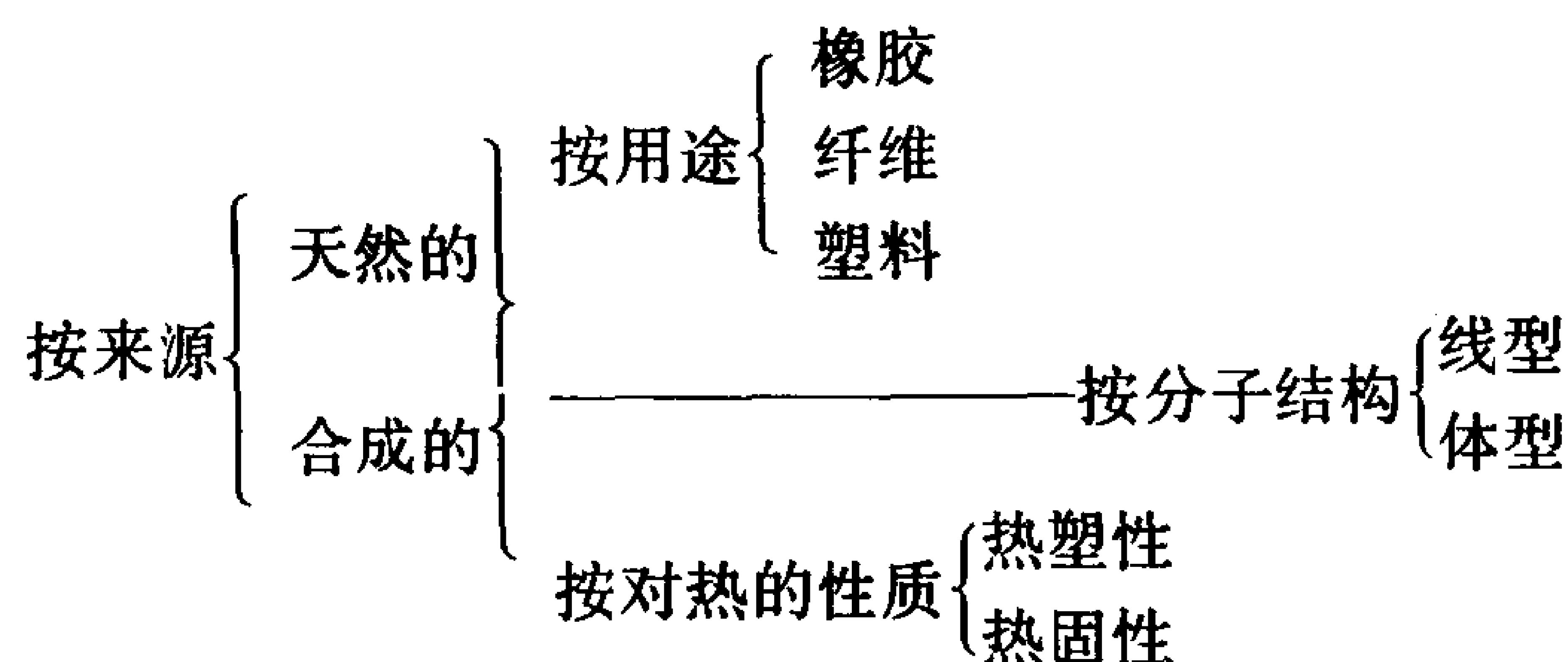
名称		分子式	分子量
低分子	乙醇	C_2H_6O	46
	蔗糖	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342
	三硬脂酸甘油脂	$C_{57}H_{110}O_6$	890
高分子	天然橡胶	$(C_6H_{10}O_5)_n$ $n=5\,000—10\,000$	800 000～80 000 000
	聚氯乙烯	$(C_2H_3Cl)_n$ $n=300—500$	20 000～160 000
	聚丙烯腈	$(C_3H_2N)_n$ $n=1\,200—11\,600$	60 000～500 000

高分子是由相同的链节组成如



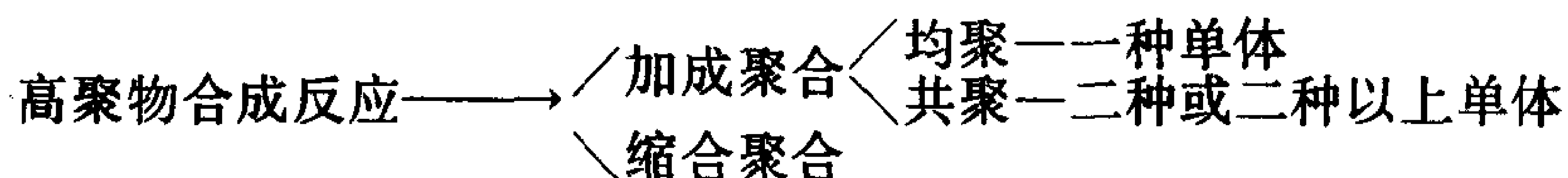
$CH_2-CH(Cl) \xrightarrow{聚合} [-CH_2-CH(Cl)-]_n$，其中〔$-CH_2-CH(Cl)-$〕称链节，$n$称聚合度，〔$-CH_2-CH(Cl)-$〕$_n$称高聚物。

2.4.2 高聚物分类



2.4.3 高聚物合成反应

含两个官能团或一个双键的单体，聚合得线型高聚物。含两个以上官能团或两个双键的单体，可能聚合成体型高聚物。



2.4.4 高聚物的性能

高聚物的物理机械性能决定于构型、聚合度、结晶性及极性基团等。电绝缘性决定于分子的极性(分子的对称性及极性基团的性质)。其化学稳定性主要与极性基团和所含的不饱和键有关。玻璃化温度Tg，粘流化温度T_f值，决定着高聚物在一般温度下的用途。几种常见高聚物的玻璃化温度如表 1.1.10-17。

表 1.1.10-17　　**几种高聚物的玻璃化温度**

高聚物	Tg (℃)	高聚物	Tg (℃)
聚苯乙烯	80～100	尼龙—66	48
有机玻璃	57～68	天然橡胶	−73
聚氯乙烯	75	丁苯橡胶	−63～−75
聚乙烯醇	85	氯丁橡胶	−40～−50
聚丙烯腈	>100	硅橡胶	−100

2.4.5 常用高分子化合物

高聚物的性能是由其结构和组成所决定的，但高聚物制品的性能还与制造时所加的填料、增塑剂、染料及加工过程等有关。一些常用和主要的高聚物如表 1.1.10-18。

表 1.1.10-18　　**一些常用和主要的高聚物**

名称	单体或原料	主要性能和用途
聚氯乙烯	$CH_2=CH(Cl)$ 氯乙烯	耐腐蚀、绝缘性好，能溶于丙酮、氯仿。可制成薄膜、板材及管子等

续上表

名称	单体或原料	主要性能和用途
聚乙烯	乙烯 $CH_2=CH_2$	质轻、化学稳定性强，电绝缘性好，耐低温(−80℃)吸湿性小；耐热性差。用于电气绝缘、机械零件等
聚苯乙烯	苯乙烯 $CH_2-CH-C_6H_5$	无色透明坚硬、易着色、绝缘性好，易脆裂，耐热性差，可用于绝缘材料、日用品等
聚四氟乙烯	四氟乙烯 $CF_2=CF_2$	耐高低温(−200～250℃)、耐强腐蚀剂、介电性能好，摩擦系数小、强度低，加工难。用于垫圈、管道、耐腐蚀材料等
酚醛塑料	苯酚—C_6H_4—OH 甲醛 HCHO	绝缘性好、耐磨、耐热、耐酸、不易裂变、但不耐碱、性脆、着色性差，用于部件及零件等
聚碳酸酯	双酚A $HO-C_6H_4-C(CH_3)_2-C_6H_4-OH$ 光气 $COCl_2$	抗冲击强度和机械性能特好、较高的耐热性、绝缘性好、透明度好、不耐浓酸碱、用于结构件、传动件、绝缘件等
脲醛塑料	尿素 $H_2N-C(=O)-NH_2$ 甲醛HCHO	抗腐蚀性和耐电弧性较好，耐热性差，吸水率较高，用于制胶合板等
聚甲醛	甲醛HCHO	强度高、硬度大、耐疲劳和耐磨性好。变形性及吸水性小，有绝缘性，用于制轴承、齿轮等
聚砜	双酚A 4，4′—二氯二苯基砜 $Cl-C_6H_4-S(=O)_2-C_6H_4-Cl$	可在−100～150℃下长期使用，电绝缘性好，透明度高，加工性及耐溶剂性差，用于电气、电子及机械工业
涤纶	对苯二甲酸 $HOOC-C_6H_4-COOH$ 乙二醇 $CH_2(OH)-CH_2(OH)$	强度大，耐酸及耐光、电绝缘性好，不皱，但吸水率低。用于绝缘材料，耐酸材料等
维纶	醋酸乙烯酯 $CH_2=CHOCOCH_3$	吸湿性好，强度大，耐酸及碱，耐光，易干不会霉蛀。用于制工作服等
腈纶	丙烯腈 $CH_2=CH-CN$	质轻，弹性好，保暖性好，耐光、热，但耐磨性差，染色难，易吸灰尘。用于制篷帐、滤布等
尼龙—6	己内酰胺 $H_2C(CH_2-CH_2)_2CH_2$ (环)	制衣物、降落伞、绝缘材料等
尼龙—66	己二酸 $HOOC-(CH_2)_4-COOH$ 己二胺 $H_2N(CH_2)_6NH_2$	强度大，轻软、耐磨、有弹性、耐油、耐潮、耐海水，但不耐酸及光，透气性差，用于轮胎、传动带等

续上表

名　　称	单体或原料	主　要　性　能　和　用　途
尼龙-1010	癸二胺 $H_2N(CH_2)_{10}NH_2$ 癸二酸 $HOOC(CH_2)_8COOH$	耐油性极高，机械强度大，耐高温、耐磨，用于制油箱、垫圈、齿轮、零件等
丁苯橡胶	丁二烯 $CH_2=CH-CH=CH_2$ 苯乙烯 $C_6H_5-CH=CH_2$	耐磨、电绝缘性好 用于制车胎、传动带等
丁腈橡胶	丁二烯 $CH_2=CH-CH=CH_2$ 丙烯腈 $CH_2=CH-CN$	耐油、耐高温、耐磨、抗老化，但弹性、耐寒性、电绝缘性差、制油箱、工业垫圈等
乙丙橡胶	乙烯$CH_2=CH_2$ 丙烯$CH_2=CH-CH_3$	化学稳定性好，耐老化、电绝缘性好、但弹性和强度不好，粘结性差、制电绝缘性
顺丁橡胶	丁二烯 $CH_2=CH-CH=CH_2$	弹性、耐磨性、耐老化性、机械强度差，制耐热胶管、电绝缘制品等
氯丁橡胶	氯丁二烯 $CH_2=C(Cl)-CH=CH_2$	耐热、耐磨、耐化学腐蚀、抗老化好，但弹性、耐寒性较差，用于制耐油制品等
环氧树脂	环氧氯丙烷 $H_2C-CH-CH_2Cl$ 二酚基丙烷 $HO-C_6H_4-C(CH_3)_2-C_6H_4-OH$	固化后机械强度很高，电绝缘性和化学稳定性好 环氧树脂填入其它材料作修补机件、制造模具等

参考文献

〔1〕北京师范大学等编著：无机化学，人民教育出版社，1981
〔2〕君敬执等著：基础无机化学，人民教育出版社，1980
〔3〕恽魁宏主编：有机化学，高等教育出版社，1982
〔4〕J. A. Duffy (Lecturer in Chemistry, University Aberdeen): General Inorganic Chemistry, Second Edition

第2篇 技术基础

第1章 测试技术

1 测量与误差分析

测量是通过专门的设备和各种试验方法求取的待测值，即为取得任一未知参数而做的全部工作，其中包括测量的误差等。

1.1 测量与误差的基本概念

1.1.1 直接测量和间接测量

1）直接测量

用预先标定好的测量仪器（或量具）与未知物理量进行直接比较，从而直接求出未知量的数值。这类测量称为直接测量。如用机械数字式转速表测量发动机转速。

2）间接测量

根据未知量与若干个变量相联系的数学关系，先分别对各个变量进行直接测量，然后将所得数值代入该关系式，求出未知量。这类测量称为间接测量。如发动机功率的测量。

1.1.2 等精度测量和不等精度测量

1）等精度测量

在测量过程中，不改变影响测量误差的各种因素(条件)，即在同一环境下，在同一仪器上用同一种方法，由同一个测量者，以同样的注意力，对同一被测量值进行次数相同的重复测量，这种测量所得到的结果，为等精度测量。测量中一般多用等精度测量。

2）不等精度测量

测量的环境、仪器的精度、测量的方法、测量人员、重复测量次数等等，全部不相同或部分不相同，为不等精度测量。

1.1.3 测量误差的由来

在测量过程中，几乎所有因素都将引起测量误差。由于任何测量的过程均含有测量对象、测量方法、测量精度和测量单位，这些都将引起测量误差。

任何一个被测量对象，客观上都存在一个唯一确定值称为真值。测量的目的是力图得到真值，但事实上由于测量时的周围环境、测量方法、仪器精度、测量人员水平等因素的影响和限制，真值是无法得到，只能得到测量值。真值与测量值之差，即形成测量值的误差。

1.1.4 测量误差的分类

目前，都是按测量误差的性质、表示方法和产生的原因来分类

1)按误差的性质来分

（1）系统误差

误差数值是恒定的或者遵循明显的变化规律。换句话说，产生系统误差的原因，通常是在测量之前就已经存在。那么，可采用实验或分析的方法掌握其变化规律，从而将测量结果加以修正，或适当地改善测量的条件与方法，以减小或者消除系统误差对测量的影响。

（2）随机误差

是对同一被测量对象在同一测量条件下进行重复测量，即使在系统误差被消除或修正之后，每次测量结果仍然会呈现出随机性的变化。产生随机误差的原因，是由许许多多暂未被掌握规律的，或一时不便于控制的微小因素所造成。任何一次测量，由于各种因素是否出现，以及这些因素所造成误差的大小、方向，事先是无法知道的，因而随机误差是不可避免的，是无法控制的。但是，人们通过长期实践，认识到利用概率论的一些理论和统计学的一些方法，对所获得的测量数据进行分析和处理，以确定其可靠的测量结果，得其误差的极限范围。

（3）过失误差

是测量结果有显著的偏差，具有明显性和个别性。产生过失误差的原因是测量者的过失或测量条件的急剧变化而引起的。含有过失误差的测量数据是不能采用的，必须设法从测得的数据中剔除。

2)按误差的表示方法来分

（1）绝对误差

指实际测量值 x 与被测量的真值 A 之间的差异，则绝对误差 Δx 为：

$$\Delta x = x - A \tag{1.2.1-1}$$

它表示误差在数值上的大小。可能是正值或负值。

（2）相对误差

它指绝体误差 Δx 与测量值 x 的比值，以百分比表示：则相对误差 δ 为：

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \tag{1.2.1-2}$$

相对误差 δ 通常用来评价测量精度。在实际中，有最大绝对误差和最大相对误差概念，在没有作特别说明时，一般所说绝对误差和相对误差就是指最大绝对误差和最大相对误差。

1.1.5 测量精度的概念

测量精度通常包括了准确度和精密度两方面的含义。

1)准确度

它表示测量仪器指示值与被测量真值的偏差。通常用系统误差的大小作为反映准确度高低的定量指标。

2)精密度

它表示对同一被测量对象进行重复测量时，各测量值之间的接近程度。在测量中随机误差越大(或越小)，则多次重复测量同一被测量时所得的各次测量值相互之间的偏离也越大(或越小)，也称重复性或弥散度。它表明测量值的精密度高低。所以，随机误差可以作为反映精密度的定量指标。

准确度和精密度是对两类不同性质的系统误差和随机误差的描述。将准确度与精密度综合称为精确度，简称精度。

1.2 直接测量误差分析

1.2.1 测量结果的确定值

在直接测量中，所测量的数据是一列的数据，如静态测量或动态测量的记录曲线整理后的数据．称测量数列。当观测到各个数据是分布在一定范围内，那么，如何决定测量结果的确定值呢？根据随机误差分布规律和最小二乘法的原理，可以得出测量结果的确定值，就是测量列的算术平均值。

$$\overline{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n} \tag{1.2.1-3}$$

式中：$\overline{x}$——测量列算术平均值；

n——测量次数；

x_i——测量列数。

这个算术平均值 $\overline{x}$ 与真值 A 的关系是当测量次数 n 为无穷大时，$\overline{x}$ 趋于 A，而当测量次数 n 为有限时，则 $\overline{x}\neq A$。但是 $\overline{x}$ 却是 A 的最佳估值（最可信赖值）。把测量值与算术平均值之差：$x_i-\overline{x}=V_i$ 称为残差或剩余误差。

1.2.2 系统误差分析

在直接测量中，可能产生系统误差，它的来源可以是以下几方面。

1)仪器误差

这是由于测量所用的仪器，本身的精度特性不完善而产生的。

如某一转速表，其精度等级为 1.5 级，满量刻度值为 5000 r/min，则其绝对误差值为：

$$5000\times1.5\%=75\ \text{r/min}$$

2)装置误差

这是由于测量仪器，没有严格按要求进行安装调试而产生。

3) 人身误差

这是由于测量人员的水平或感觉器官和运动器官不完善而产生的有规律误差。

4)环境误差

这是由于使用测量仪表时的实际环境：压力、温度、湿度、振动、电磁场等与说明书所给定的环境条件不符合时所引起的。因此，在记录测量结果时，必须同时记录环境条件。

5)方法误差

这是由于测量方法本身不完善或测量所依据的理论不完善等所引起的。

从以上可知：系统误差一般是有规律，是可知的，是能够掌握的，是属于技术上的问题。只要采取适当的措施，可以对其进行消除或修正，然后才能进行随机误差分析。

1.2.3 随机误差分析

从许多测量的实践中得知：测量误差中不可避免地存在着随机误差，而随机误差是服从统计规律的，随着测量次数的增加，这种规律性表现越明显，它的规律一般表现出正态分布。可用正态分布函数表示：

$$P(\Delta x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\ e^{-\frac{\Delta x}{2\sigma^2}} \tag{1.2.1-4}$$

式中：e——自然对数的底 $e\approx2.71828\cdots\cdots$；

$P(\Delta x)$——概率密度；

Δx——测量误差；

σ——标准误差。

标准误差 σ 可以写成：

$$\sigma=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i)^2}=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-A)^2} \quad (1.2.1\text{-}5)$$

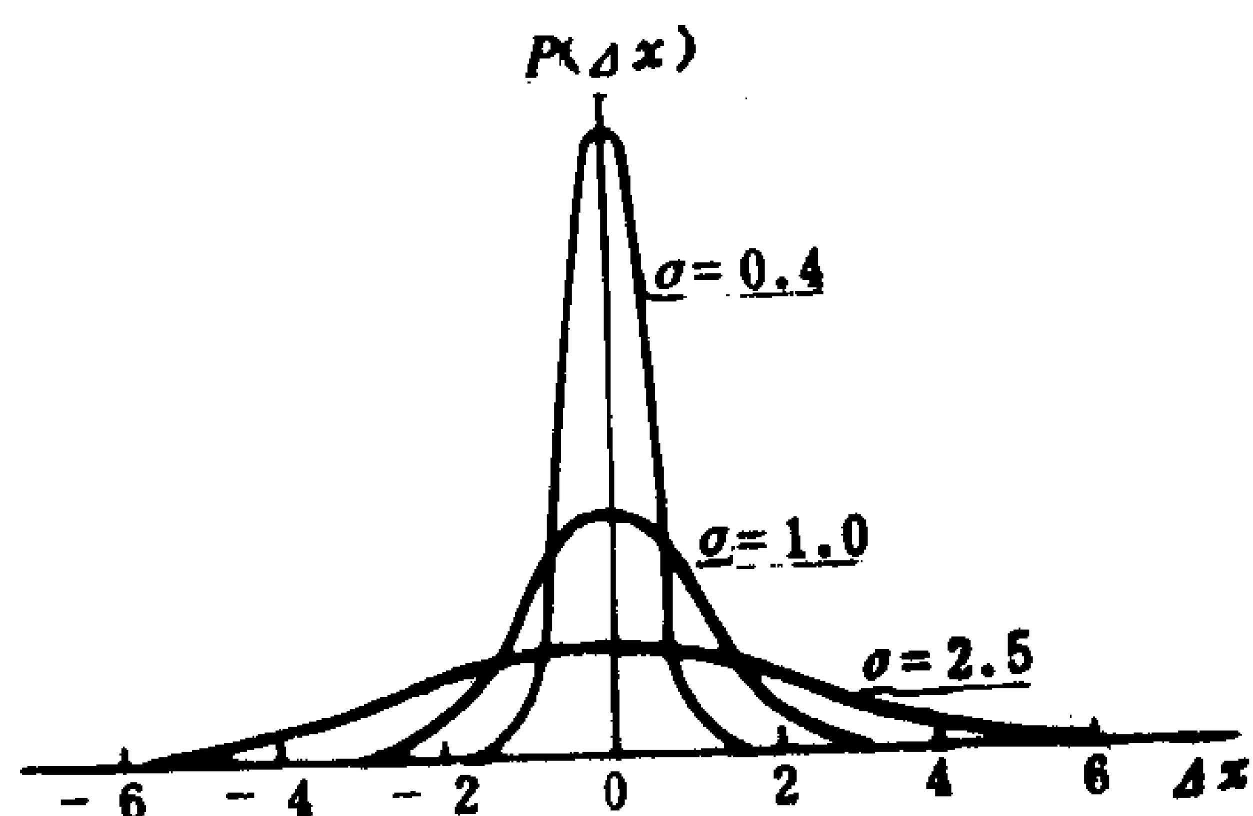


图 1.2.1-1　正态分布曲线

函数$P(\Delta x)$曲线如图 1.2.1-1，称为正态分布曲线，也称高斯曲线。

随机误差的特性可归纳为如下 4 个特性：

1)绝对值相等的正误差和负误差，其出现的概率相同。

2)绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小。

3)绝对值很大的误差出现的概率近于零，即误差值有一定的极限。

4)当测量次数 n 趋于无穷大时，其误差的算术平均值趋于零。

在分析系统误差和随机误差时，应该指出它们之间还没有十分严格的界线，不少系统误差其出现往往带有随机性，也常常把某些虽可掌握而过于复杂的系统误差作为随机误差处理。任何一次测量，一般系统误差和随机误差都是同时存在的，在具体处理上，应该根据测量结果影响的程度分别情况加以处理：

（1）当系统误差远大于随机误差的影响时，应该先处理系统误差后，再按随机误差来处理实验结果。

（2）当系统误差小得可略去不计时，或已经改正，就可按随机误差来处理。

1.3　间接测量的误差分析

1.3.1　间接测量的误差计算

柴油机试验时，有些参数不能直接测量，而要基于其它几个数值的直接测量后，根据一定公式计算出。这样不可避免地会带来一定误差，误差的大小，决定于几个直接测量的误差和其相互间的函数关系。

假定间接测量值为 y，直接测量值为 x_1、x_2、……x_n，它们之间可用下面的函数关系表示：

$$y=f(x_1、x_2\cdots\cdots x_n) \quad (1.2.1\text{-}6)$$

该函数的绝对误差，即间接测量值 y 的绝对误差为 Δy，该函数自变量 x_1、x_2、……x_n 的相应绝对误差为 Δx_1、Δx_2……、Δx_n，按误差理论，该函数的误差计算公式如下：

1）绝对误差

$$\Delta y=\frac{\partial y}{\partial x_1}\Delta x_1\pm\frac{\partial y}{\partial x_2}\Delta x_2\pm\cdots\cdots\pm\frac{\partial y}{\partial x_n}\Delta x_n \quad (1.2.1\text{-}7)$$

即多变量函数的误差，等于此函数偏微分各项绝对值之和。

2)相对误差

$$\frac{\partial y}{y}=\frac{\partial y}{\partial x_1}\cdot\frac{\Delta x_1}{y}\pm\frac{\partial y}{\partial x_2}\cdot\frac{\Delta x_2}{y}\pm\cdots\cdots\pm\frac{\partial y}{\partial x_n}\cdot\frac{\Delta x_n}{y} \qquad (1.2.1\text{-}8)$$

即多变量函数的相对误差，等于此函数自然对数的微分，但须取微分中各项的绝对值。

1.3.2　测量结果的确定值

根据误差理论得知，间接测量结果的确定值是将各直接测量到的算术平均值 $\overline{x}_1$、$\overline{x}_2$、……$\overline{x}_n$，代入函数关系式 $y=f(x_1 x_2\cdots x_n)$，便可求得间接测量值的算术平均值 $\overline{y}$。

1.3.3　间接测量中的标准误差和或然误差的计算公式

1)间接测量中的标准误差

$$\sigma=\sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2\sigma_{x_1}^2+\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2\sigma_{x_2}^2+\cdots\cdots+\left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2\sigma_{x_n}^2} \qquad (1.2.1\text{-}9)$$

2)或然误差

$$P=0.6745\,\sigma=\sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 p_{x_1}^2+\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 p_{x_2}^2+\cdots\cdots+\left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 p_{x_n}^2} \qquad (1.2.1\text{-}10)$$

式中：σ_{x_1}、σ_{x_2}……σ_{x_n}——分别为直接测量 x_1、x_2、……x_n的标准误差；

p_{x_1}、p_{x_2}……p_{x_n}——分别为直接测量 x_1、x_2、……x_n或然误差。

1.4　测量结果的评定

为了表示测量结果的可靠性，一般用标准误差，或然误差和极限误差来表示。

1.4.1　标准误差

测量值的标准误差定义为

$$\sigma=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i)^2} \qquad (1.2.1\text{-}11)$$

这是指测量次数无穷多时的标准误差。

当测量次数有限时，根据误差理论，则标准误差为：

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(x_i-\overline{x})^2} \qquad (1.2.1\text{-}12)$$

式中，$(x_i-\overline{x})$称残差，它表示测量次数有限时，每次个别测量值与有限测量次数的算术平均值之差。

标准误差的大小可以表示测量精度的高低。即表示测量结果的可靠性，如测量误差在$\pm\sigma$范围内的概率是68.3%，在$\pm 2\sigma$ 范围内的概率是95.4%，在$\pm 3\sigma$范围内的概率是99.7%。

例：用一个水银温度计测量温度时，得到的读数是50℃，通过多次测量结果，得出其标准误差为1℃，那么当我们写出50°±1℃时，有68.3%的测量结果在这个范围内，而31.7%则不在这个范围内。

1.4.2　或然误差

它又称概率误差 P 为

$$P=0.6745\sigma \qquad (1.2.1\text{-}13)$$

其意义是，在一系列的测量中，测量误差在$\pm P$ 的范围内的机会是50%，也就是说，在这个范围内有50%的概率包含着真实值，有50%的概率不包含它。

1.4.3　极限误差（最大可能误差）

从事工程技术工作的总希望给出误差最大可能范围，这个范围定为标准误差的 3 倍。

$$\delta_m = 3\sigma \tag{1.2.1-14}$$

从正态分布曲线可以知道，误差介于 $\pm 3\sigma$ 范围内出现的概率是 99.7%，几乎全部在 $\pm 3\sigma$ 之间，而在 $\pm 3\sigma$ 范围之外的随机误差仅有 0.3%，出现的机会相当小。

1.5 实验数据处理方法及测量结果的表示方法

1.5.1 直接测量数据处理步骤及表示

在等精度测量 n 次以后，得出是测量数列，数据处理的任务是决定测量的确定值，测量值的精度和确定值的精度，其步骤和表示方法如下：

1)求测量数列的算术平均值：

$$\overline{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} \tag{1.2.1-15}$$

2)求测量数列的残差

$$V_i = x_i - \overline{x} \tag{1.2.1-16}$$

3)求测量值的标准误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} \tag{1.2.1-17}$$

4)求算术平均值的标准误差

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} \tag{1.2.1-18}$$

5)测量结果的表示

(1)测量值极差的表示

$$\delta_x = \overline{x} \pm 3\sigma \tag{1.2.1-19}$$

(2)测量确定值的极差的表示

$$\delta_m = \overline{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} \tag{1.2.1-20}$$

例：某试验台在测量流量 G，取等精度测量次数 $n=6$，得到一组测量数据为：

测 量 次 数	1	2	3	4	5	6
测 量 值	1.52	1.46	1.61	1.54	1.55	1.49

实验数据处理和表示方法如下

①求算术平均值 $\overline{G}$

$$\overline{G} = \frac{\sum_{i=1}^{6} G_i}{6} = \frac{1.52+1.46+1.61+1.54+1.55+1.49}{6} = 1.5283$$

取 $\overline{G} = 1.53$

②求测量值的残差，根据残差公式

$$V_i = G_i - \overline{G}$$

分别为

测量次数	1	2	3	4	5	6
残差	-0.01	-0.07	0.08	0.01	0.02	-0.04

③求测量值标准误差

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{6}(G_i-\overline{G})^2}$$

$$=\sqrt{\frac{1}{5}[(-0.01)^2+(-0.07)^2+(0.08)^2+(0.01)^2+(0.02)^2+(-0.04)^2}$$

$$=0.052$$

④求算术平均值标准误差

$$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=\frac{0.052}{\sqrt{6}}=0.0212$$

⑤测量结果表示

(a)测量值的极差

$$=\overline{G}+3\sigma=1.53\pm3\times0.052=1.53\pm0.156$$

(b)确定值的极差

$$=\overline{G}+3\sigma_{\bar{x}}=1.53\pm3\times0.0212=1.53\pm0.0636$$

1.5.2 间接测量数据处理步骤及表示

若间接测量值是由 $y=f(x_1, x_2, \cdots\cdots x_m)$ 的函数关系所决定的，若各直线测量值的等精度测量次数为 n，则数据处理的步骤和表示如下，

1)求各直接测量值的算术平均值

$$\overline{x}_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{1i}$$

$$\overline{x}_2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{2i}$$

$$\cdots\cdots$$

$$\overline{x}_m=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{mi} \qquad (1.2.1\text{-}21)$$

2)求间接测量的确定值

$$\overline{y}=f(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \cdots\cdots \bar{x}_m) \qquad (1.2.1\text{-}22)$$

3)求各直接测量值的标准误差

$$\sigma_{x_1}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{1i}-\overline{x}_1)^2}$$

$$\sigma_{x_2}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{2i}-\overline{x}_2)^2}$$

$$\cdots\cdots$$

$$\sigma_{xm}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{mi}-\overline{x}_m)^2} \qquad (1.2.1\text{-}23)$$

4)求间接测量的标准误差

$$\sigma_y=\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x_1})^2\sigma_{x_1}^2\pm(\frac{\partial f}{\partial x_2})^2\sigma_{x_2}^2+\cdots+(\frac{\partial f}{\partial x_m})^2\sigma_{xm}^2} \qquad (1.2.1\text{-}24)$$

5)求间接测量确定值的标准误差

$$\sigma_{\bar{y}}=\frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} \tag{1.2.1-25}$$

6)测量结果的表示

测量值的极差

$$\sigma_x=\pm 3\,\sigma_y \tag{1.2.1-26}$$

确定值的极差

$$\sigma_m=\pm 3\,\sigma_{\bar{y}} \tag{1.2.1-27}$$

1.6 过失误差处理

判别过失误差的界限，实质上确定随机误差的分布范围，超出某一范围的偏大误差，可以认为不属于随机误差的分散性，视为过失误差，如绝对值超过± 3 σ的大误差出现的概率为 0.003。相当于 330 个数中只有一个数值在± 3 σ误差范围以外，其他都在± 3 σ误差的准则，即凡残差超过± 3 σ，$|V_i|>3\sigma$为过失误差。除此，还有其他判别准则，现分别说明如下：

1.6.1 莱因达准则

以 3 σ为判据，将$|V_i|>3\sigma$的测量值 x_i 加以剔除，摒弃不取。

例：对某恒温室温度测量 15 次，得下表所列数据。试用莱因达准则判断该 15 个测量值中是否含有过失误差。

表 1.2.1-1　　某温度测量值数据列

序号 i	测量值 T_i (℃)	剔除过失误差前 $V_{Ii}=T_i-\overline{T}_I$ (℃)×10^{-3}	剔除过失误差前 V_{Ii}^2 (℃)^2×10^{-6}	剔除过失误差后 $V_{IIi}=T_i-\overline{T}_{II}$ (℃)×10^{-3}	剔除过失误差后 V_{IIi}^2 (℃)×10^{-6}
1	20.42	+16	256	+9	81
2	20.43	+26	676	+19	361
3	20.40	−4	16	−11	121
4	20.43	+26	676	+19	361
5	20.42	+16	256	+9	81
6	20.43	+26	676	+19	361
7	20.39	−14	196	−21	441
8	20.30	−104	10816	/	/
9	20.40	−4	16	−11	121
10	20.43	+26	676	+19	361
11	20.42	+16	256	+9	81
12	20.41	+6	36	−1	1
13	20.39	−14	196	−21	441
14	20.39	−14	196	−21	441
15	20.40	−4	16	−11	121
	$\overline{T}_I$=20.404℃ $\overline{T}_{II}$=20.411℃		ΣV_{Ii}^2 =14960		ΣV_{IIi}^2= 3374

解：$\overline{T}_I=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}T_i=20.4+\frac{1}{15}$（2 + 3 + 0 + 3 + 2 + 3 − 1 −10− 0 + 3 + 2 + 1 − 1 − 1 + 0）×10^{-2}

$=20.4+\frac{1}{15}\times 6\times10^{-2}=20.404$（℃）

$$\sigma_{I}=\sqrt{\frac{\sum V_{Ii}^{2}}{n-1}}=\sqrt{\frac{14960}{15-1}}\times10^{-3}=3.3\times10^{-2}\ (℃)$$

$$3\sigma_{I}=9.9\times10^{-2}$$

因为 $|V_8|=|-104\times10^{-3}|=10.4\times10^{-2}$

即 $|V_8|>3\sigma_I$

所以 $T_8=20.30$℃中含有过失误差，应予剔除。

为了进一步查明，除 T_8 外，其余 14 个测量值是否还含有过失误差。剔除 T_8 后，还要计算余下的 14 个测量值的平均值。

$$\overline{T}_{II}=20.4+\frac{1}{14}(2+3+0+3+2+3-1+0+3+2+1-1-1+0)$$

$$\times10^{-2}=20.4+\frac{1}{14}\times16\times10^{-2}=20.411(℃)$$

$$\sigma_{II}=\sqrt{\frac{\sum V_{IIi}^{2}}{n-1}}=\sqrt{\frac{3324}{14-1}}\times10^{-3}=1.6\times10^{-2}\ (℃)$$

$$3\sigma_{II}=|4.8\times10^{-2}|℃=4.8\times10^{-2}\ (℃)$$

即除 T_8 以外，其余 14 个测量值的剩余误差的绝对值都小于 $3\sigma_{II}$，故可以认为剔除 T_8 后其余测量值中，不含有过失误差。

如果重复测量次数不大(如 $n<50$ 次)，此准则来判断和剔除含有过失误差的测量值就不一定可靠而偏于保守。若测量次数 $n<10$ 次，就无法找出过失误差。这样人们就提出第二个准则。

1.6.2 肖维勒准则

当重复测量的次数不多时，服从正态分布而含有的随机误差，不宜采用 $\pm3\sigma$ 作为判别和剔除过失误差的界限。肖维勒准则的核心是提出对数据保留的合理误差范围是同测量次数 n 有关的。

肖维勒准则的判定步骤如下：

1)求可疑数据的残差 V_i 与标准误差 σ 之比：$\frac{V_i}{\sigma}$

2)根据表 1.2.1-2，所列出的 n 与 c 决定可疑数据的取舍：当可疑数据的残差 V_i 与标准误差 σ之比值大于表 1.2.1-2 中的 c 值时，可将可疑数据舍弃。

表 1.2.1-2 **肖维勒判据**

n	c	n	c	n	c
5	1.65	15	2.13	30	2.39
6	1.73	16	2.16	35	2.45
7	1.79	17	2.18	40	2.50
8	1.86	18	2.20	50	2.58
9	1.92	19	2.22	60	2.64
10	1.96	20	2.24	80	2.74
11	2.00	22	2.28	100	2.81
12	2.04	24	2.31	150	2.93
13	2.07	26	2.34	185	3.00
14	2.10	28	2.37	200	3.02

例：试用肖维勒准则判别上例温度测量的 15 个测量值中是否含有过失误差

解：$n_1=15$ 查表 1.2.1-2，得 $c=2.13$，由例

求 $\sigma_I=3.3\times10^{-2}$ ℃，$V_8=10.4\times10^{-2}$ ℃

$$\frac{V_8}{\sigma}=\frac{10.4\times10^{-2}}{3.3\times10^{-2}}=3.15>2.13$$

所以 $T_8=20.30$℃，含有过失误差的测量值，应予剔除。

再计算余下的 14 个测量值是否还含有过失误差

$n_2=14$，查表 1.2.1-2，得 $c=2.10$，由上例温度测量中求 $\sigma_{II}=1.6\times10^{-2}$ ℃

因为从各测量值中求 $\frac{V_i}{\sigma}$ 均小于 $c=2.10$，故用肖维勒准则判别结果，除 T_8 以外，其余 14 个测量值均不含有过失误差。

2 变换器原理

2.1 电阻式变换器

2.1.1 电阻应变式变换器

电阻应变式变换器是将被测量的力、压力、荷重、扭力等，通过它们所产生的金属弹性变形转换成电阻变化的元件，称电阻应变片。

目前，应用最广泛的电阻应变片有两种：电阻应变片和半导体应变片。

1）电阻应变片工作原理

设有一根长度为 l、截面积为 a，电阻率为 ρ 的金属丝，其原来电阻为 R。则

$$R=\rho\frac{l}{a} \tag{1.2.1-28}$$

如果沿整条金属丝作用均匀应力，由于 l、a、ρ 的变化，则 R 也将变化。将式（1.2.1-28）全微分得：

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta l}{l}(1+2\mu)+\frac{\Delta\rho}{\rho}=\left(1+2\mu+\frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}\right)\frac{\Delta l}{l} \tag{1.2.1-29}$$

此式就是应变效应的表达式。应变灵敏系数 K_0 为：

$$K_0=\frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}=1+2\mu+\frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} \tag{1.2.1-30}$$

K_0 受两个因素的影响：一是（$1+2\mu$），它是由电阻丝几何尺寸改变引起的，对某种材料来说它是常数，另一个是（$\Delta\rho/\rho/\Delta l/l$）它是由电阻丝的电阻率随应变的改变所引起的，对于多数的电阻丝，其值也是常数，往往甚小，可以忽略。

对大多数金属材料，泊松比 $\mu=0.3\sim0.5$。所以 K_0 的数值在 1.6 至 2 之间。

这样，1.2.1-30 式可简化为

$$\frac{\Delta R}{R}=K_0\frac{\Delta l}{l}=K_0\cdot\varepsilon \tag{1.2.1-31}$$

式中，$\varepsilon=\frac{\Delta l}{l}$，称为应变。由于一般应变量数值很小，实用上都以微应变（$\mu\varepsilon$）来表示。

1 微应变 $=10^{-6}$ 应变。

每一种电阻丝，在一定的变形范围内无论受拉或受压，应变灵敏系数基本保持不变，即 $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ε 是线性变化的，这就是应变片能做为电阻应变测量的理论基础。

2）电阻应变片结构和种类

电阻应变片常用种类有金属丝式、箔式、应变花式等。

（1）金属丝式应变片

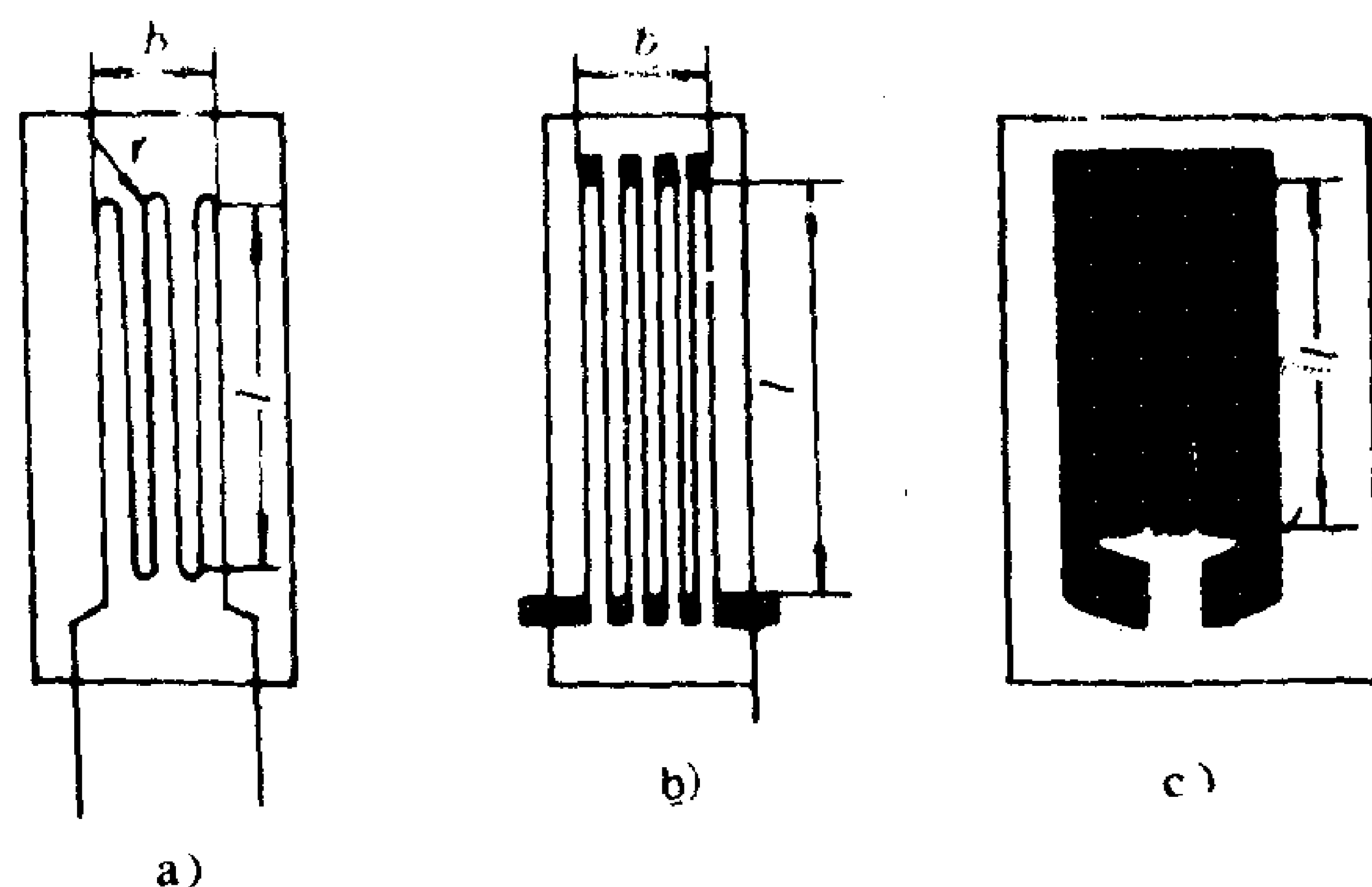


图 1.2.1-2 几种金属应变片的形状

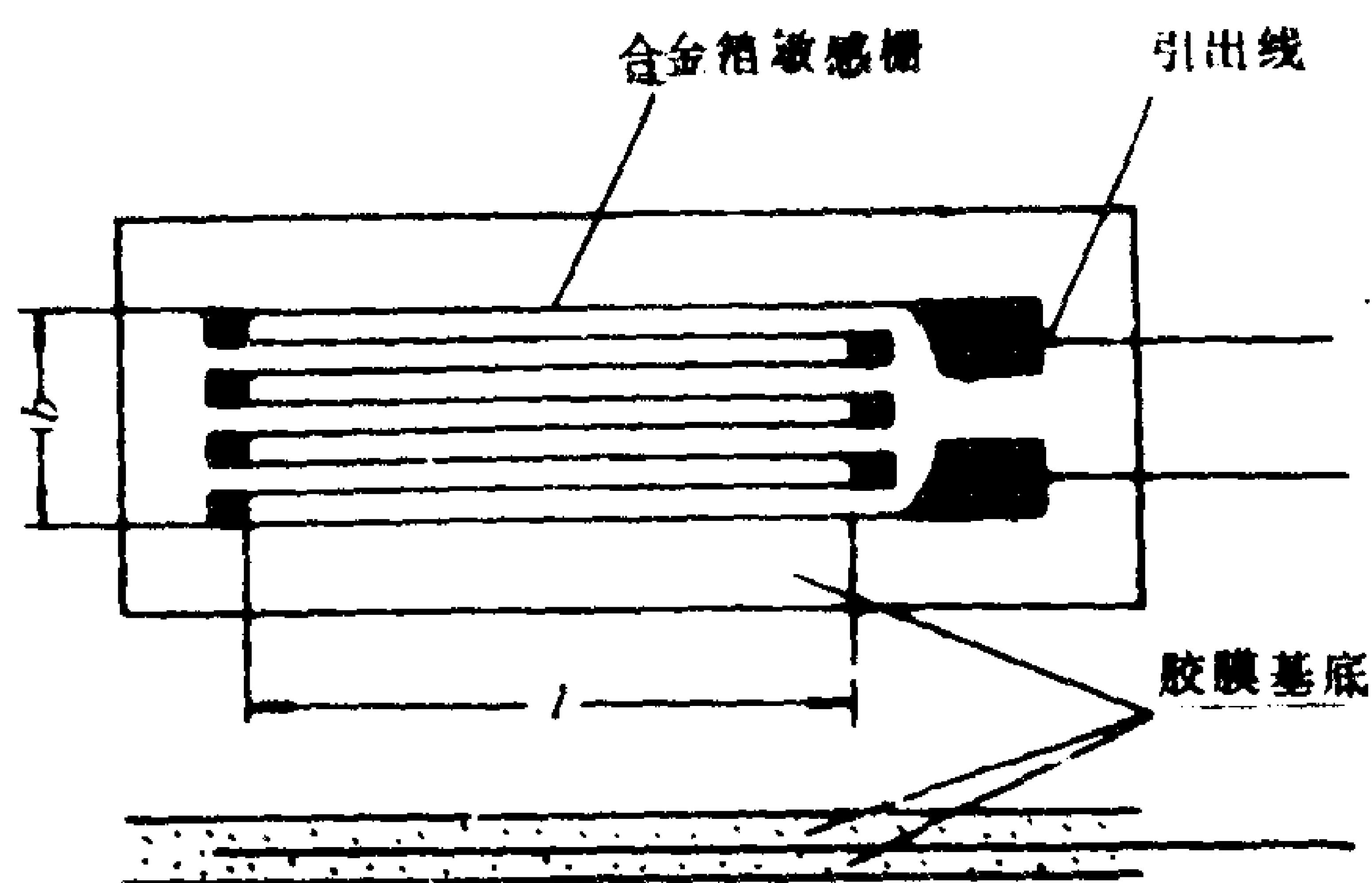


图 1.2.1-3 箔式应变片

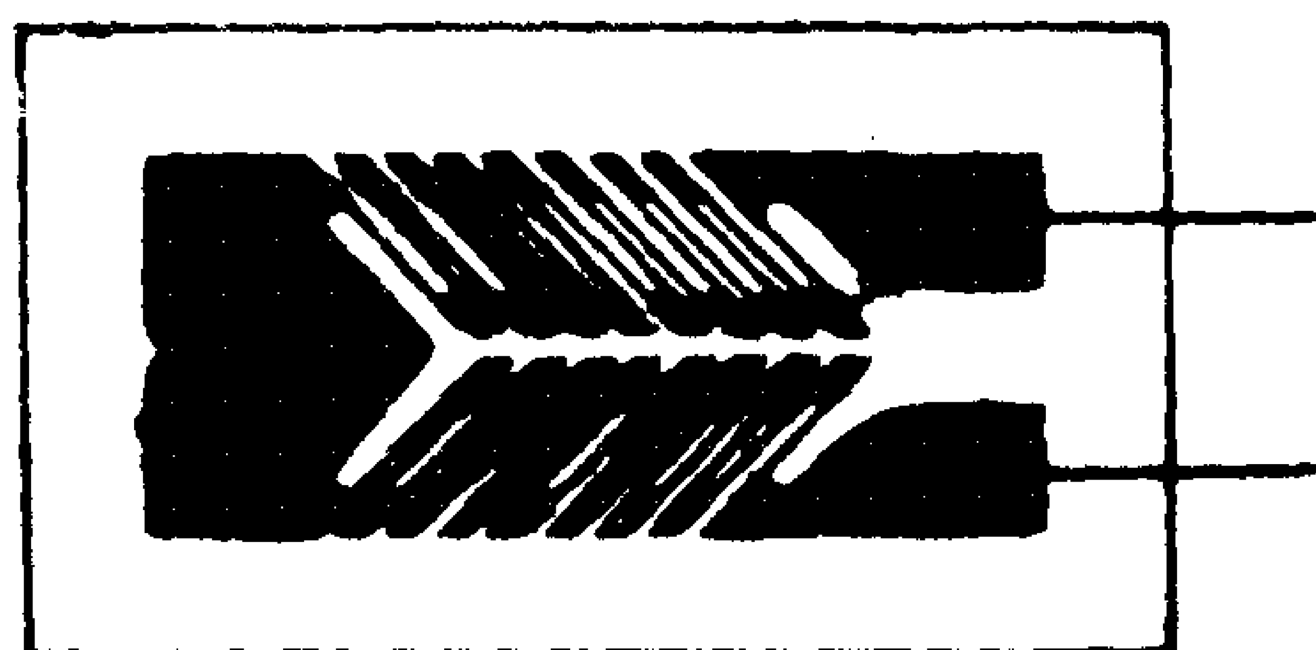
金属丝式分圆角丝栅式如图 1.2.1-2 a和直角丝栅式如图 1.2.1-2 b、c。

前者为最常见的形式，制造方便，但它的应变横向效应比直角线栅式和箔式大。圆角线栅式所采用的金属丝直径为 0.02～0.04 mm，基长 L 可在 75 mm内变化，圆角的曲率半径 r 的范围在 0.1～0.3 mm。应变片的基底一般常用薄纸制造，称纸基应变片，工作环境低于70℃。也有采用浸有酚醛树脂的纸作为基底，工作温度可提高到 180℃，另外有胶基应变片，基底多用有机聚合物薄膜。

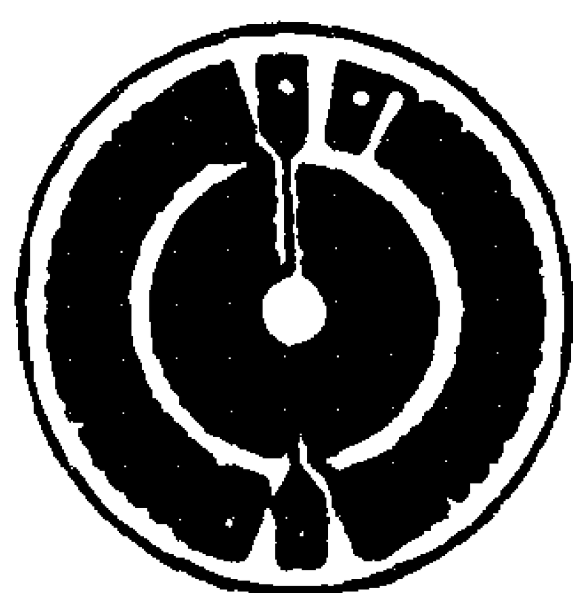
直角丝栅式虽然克服了横向效应弊病，但因制造工艺复杂，又因出现了更优越的箔式应变片，故没有得到广泛的应用。

（2）箔式应变片

应变片的敏感栅是用 0.003～0.001 mm 厚的合金电阻箔片，用光刻腐蚀技术制成，用胶膜做基底，如图 1.2.1-3，它的敏感栅形状，尺寸很准确，因此同批应变片的电阻值，灵敏度系数分散度很小，并且比较容易制成任何形状的和小标距的应变片，如图 1.2.1-4 所示，以适应不同的测量需要。目前，最小标距可到 0.2 mm，电阻值为 120 Ω。敏感栅横向是连续直线，并且截面积较大，所以横向效应极小可以忽略不计。另外，散热性、疲劳寿命、蠕变等性能，都大有改善。通常箔式应变片都是用环氧树脂、聚酯树脂等高分子聚合材料作基底。因此防潮、耐热，绝缘以及长期稳定等性



a）用于测量扭矩的



b）用于压力传感器的

图 1.2.1-4 各式箔式应变片

a）用于测量扭矩的；

b）用于压力传感器的各式箔式应变片

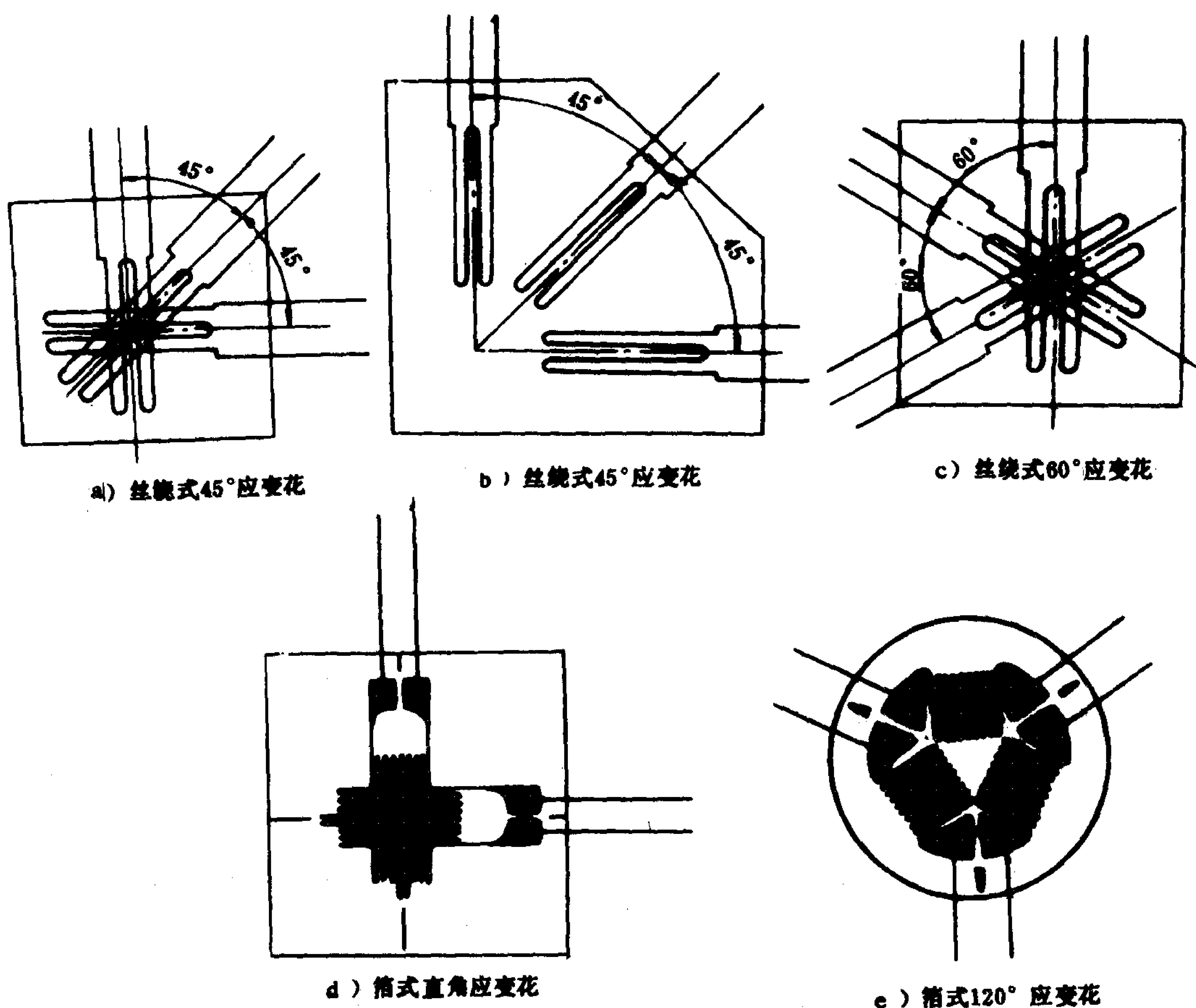


图 1.2.1-5 箔式和丝绕式电阻应变花

能都较好。

(3)电阻应变花

在两向应力状态时，需要测出一点的两个或三个方向的应变，方可求取此测点的主应力的大小和方向。这就要使用粘贴在一个公共基底上，按一定方向布置的 2-4 个敏感栅组成的电阻应变片。这种应变片叫做电阻应变花，如图 1.2.1-5。

3)电阻应变片主要特性

(1)灵敏系数 K

它是在单向应力状态下的标准标定装置(如钢制纯弯曲梁或等强度悬臂梁，钢材的泊松比 $\mu=0.285$）上做实验。应变片沿着主应力方向粘贴，当装置受力后，应变片的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与贴处相应的表面应变 ε 之比，即是应变片的灵敏系数 $K=\frac{\Delta R}{R}/\varepsilon$。

实验说明，应变片的灵敏系数 K，恒小于金属丝灵敏系数 K。其原因，除了胶体传递变形失真外，就是存在着横向效应。

(2)横向效应

粘贴在试件上的应变片，它的敏感栅是由许多条直线及圆角部分所组成，测量时被测构

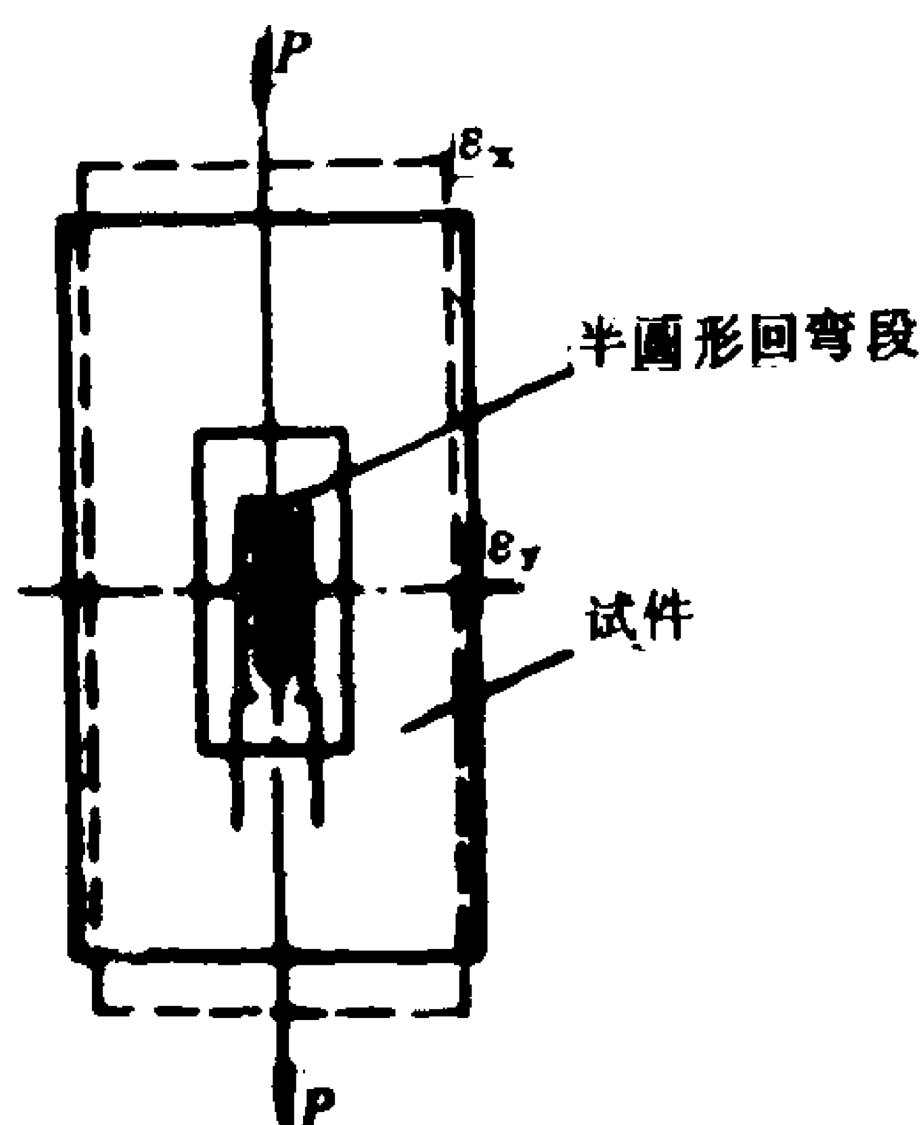


图 1.2.1-6　横向效应

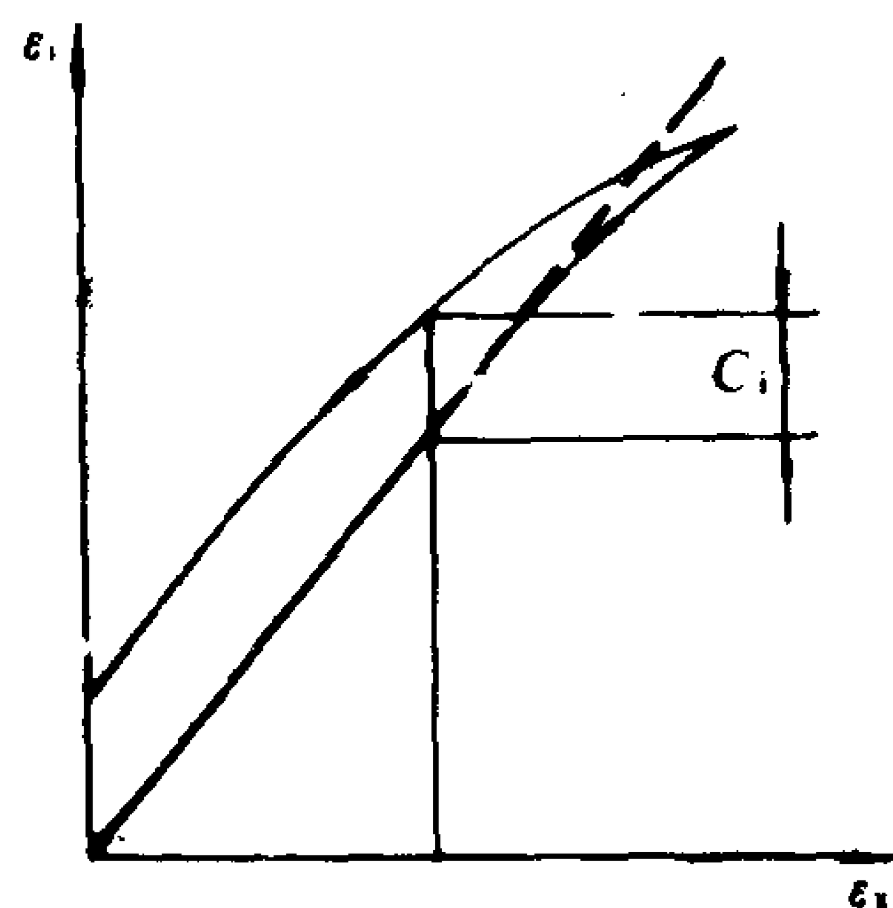


图 1.2.1-7　机械滞后

件的轴向应变 ε_x 使敏感栅的电阻发生变化；而构件的横向应变 $\varepsilon_y=-\mu\varepsilon_x$，也要被圆角部分感受，如图 1.2.1-6，而使敏感栅的电阻发生变化，但两者符号相反，后者对轴向应变形成的电阻改变有一定的抵销作用，相当于降低了应变片对轴向应变的敏感程度，这种现象叫做横向效应。使用圆角丝栅式应变片时，对于精度要求较高的应变测量，需要考虑修正问题。

（3）绝缘电阻 R_m

它是指应变片引出线与粘贴应变片的构件之间电阻，一般要求在 50～100 MΩ以上这才能保证应变测量的正常进行和测量精度。它也是检查应变片粘贴质量，粘结剂是否完全干燥或固化的重要标志。

（4）机械滞后

当贴有应变片的试件进行循环加载和卸载时，加载时和卸载时的 $\frac{\Delta R}{R}-\varepsilon$ 特性曲线的不重合程度称为机械滞后。

把加载和卸载特性曲线的最大差异值，称为应变片的机械滞后值，如图 1.2.1-7 所示。

一般对于新粘贴好的应变片，最好在正式测量前对试件进行三次以上的加载，卸载循环，以减小应变片的机械滞后和非线性。

（5）零漂和蠕变

粘贴在试件上的应变片在不承受载荷的条件下，并在恒定的温度环境中，指示应变随时间变化的特性，称为应变片的零漂。

粘贴在试件上的应变片，保持温度恒定，在某一恒定的机械应变长期作用下，指示应变随时间变化的特性称为应变片的蠕变。

（6）温度效应

粘贴到试件上的应变片，除了感受机械应变而使电阻相对变化外，当环境温度变化时，也要引起电阻相对变化，这种现象称为温度效应。前者是我们要测量的，后者是一种虚假应变，必须在测量中予以消除。

由温度变化而引起的电阻变化与下列因素有关：

$$\frac{\Delta R_t}{R}=\alpha_s\Delta t+K(\beta_g-\beta_s)\ \Delta t \tag{1.2.1-32}$$

式中：ΔR_t——由温度变化形成的总电阻变化；

α_s——电阻丝材料的电阻温度系数；

β_g——构件材料的线膨胀系数，$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{m}}/℃$；

β_g——敏感栅材料的线膨胀系数，$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{m}}$/℃；

Δt——环境温度变化。

对应的应变

$$\varepsilon_t=\frac{\Delta R_t}{R}/K=\frac{1}{K}\alpha_s\Delta t+(\beta_g-\beta_s)\Delta t \tag{1.2.1-33}$$

这个虚假应变是相当大的，有时甚至超过机械应变值。测量时，一般采取补偿的方法加以消除，这叫做温度补偿。常用的补偿方法有两种：一种是桥路补偿法，用于常温下测量；一种是温度自补偿应变片，用于高温测量。

4）半导体应变片

金属电阻应变片虽然有很多优点，但却存在一大弱点就是灵敏系数低。1958年出现半导体应变片，其灵敏系数比一般应变片大几十倍甚至百倍。另外，它的横向效应几乎为零，机械滞后小，频率响应快，频带宽以及可以制成超小型应变片等特点。它的出现为应变传感器的发展开创了新的途径。

半导体应变片是基于半导体材料的电阻率随作用应力而变化的所谓“压阻效应”。压阻效应大小用压阻系数来表示。当半导体压阻元件承受纵向与横向应力时，相对电阻率可用下式表示：

$$\frac{d\rho}{\rho}=\pi_L\sigma \tag{1.2.1-34}$$

式中：π_L——半导体材料的纵向压阻效应系数；

σ——纵向受到的应力。

上式也可以写成为：

$$\frac{d\rho}{\rho}=\pi_L\cdot E\cdot\varepsilon \tag{1.2.1-35}$$

式中：E——半导体材料的弹性模量（$\mathrm{dyn/cm^2}$）；

ε——沿半导体材料的纵向应变。

在上述应力作用下的半导体应变片，其电阻变化率同样适用于“应变效应”其表达式为：

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta L}{L}(1+2\mu)+\frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{1.2.1-36}$$

半导体应变片的灵敏系数 K 可表示为：

$$K=1+2\mu+\pi_L\cdot E \tag{1.2.1-37}$$

该式中的（$1+2\mu$）项是“应变效应”引起的，而 $\pi_L\cdot E$ 是由“压阻效应”引起的，其数值为前者的几十倍，即 $K=60\sim170$，故前项的数值可以忽略不计，上式可写成

$$K=\pi_L\cdot E \tag{1.2.1-38}$$

半导体应变片的主要缺点：一是温度稳定性差，一是灵敏系数的非线性大，所以在使用时需采用温度补偿和非线性补偿措施。

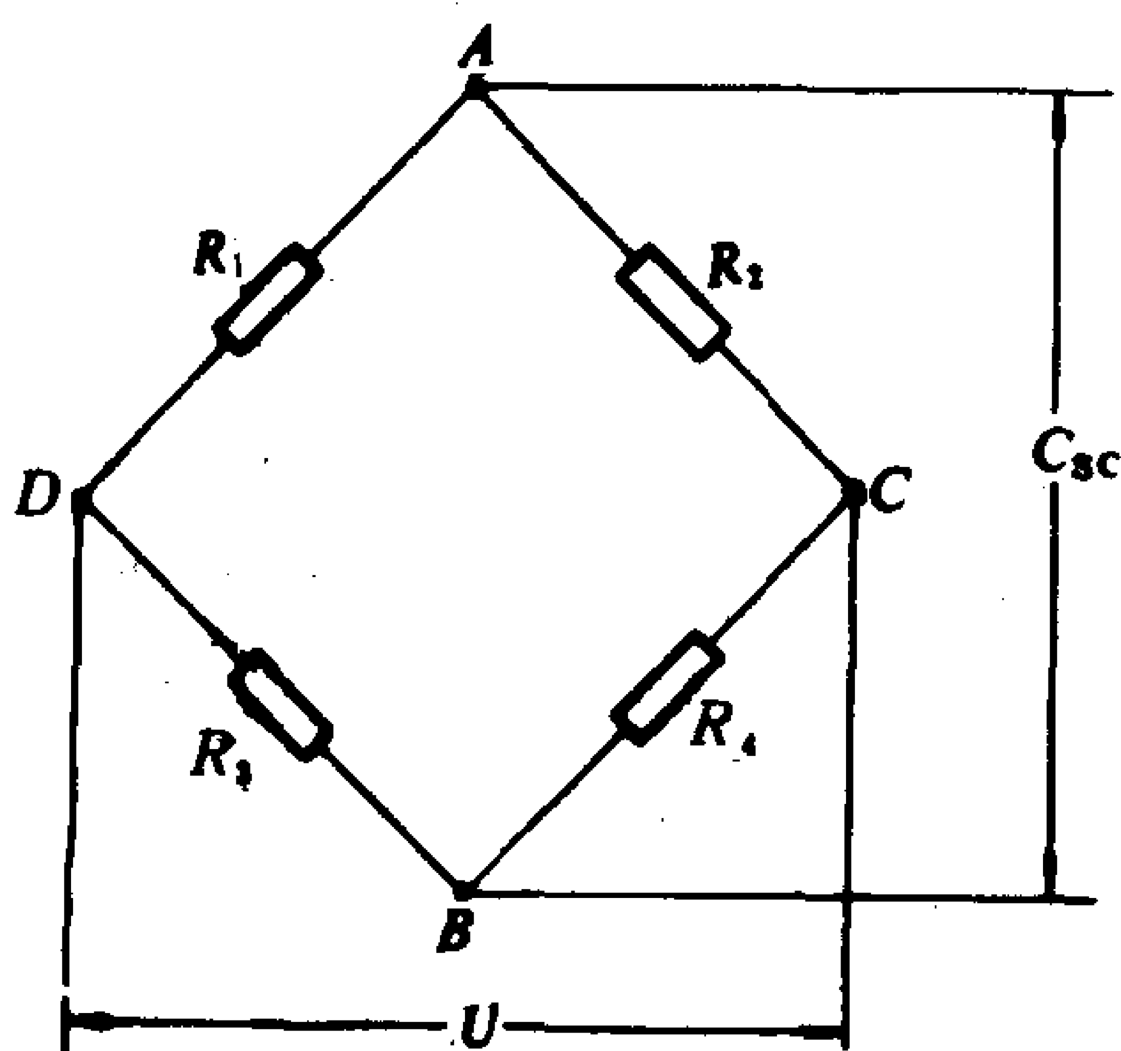


图 1.2.1-8 桥式测量电路

5)测量电路

（1）电桥测量电路的分析

通过应变片可以把被测非电量转换为电阻 R，但还须进一步把它转换成电流或电压，才可用电测仪表进行测量。电桥电路是进行这种变换的最常用的一种方法。

电桥测量电路有 4 个电阻如图 1.2.1-8，其中任一个都可以是电阻应变片电阻。电桥的一对角线接入供桥电压 V，则另一个对角线为输出端。电桥的一个特点是：四个电阻达到某一关系时，电桥的输出为零，称电桥平衡，否则就有电压或电流输出，根据不同要求，电桥电路可以是电压输出，也可以是电流输出。

①电流输出

若电桥输出端的负载电阻为 R_g，如图 1.2.1-9，流过的电流为 I_g，根据等效定理得：

$$I_g = V\frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_g(R_1+R_2)(R_3+R_4)+R_1R_2(R_3+R_4)+R_3R_4(R_1+R_2)} \quad (1.2.1\text{-}39)$$

当 $I_g \neq 0$ 时，称为电桥不平衡，当 $I_g = 0$ 时，称为电桥平衡。即 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$

当采用全等臂电桥时，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$时，设 R_1 产生 ΔR 的增量，先以 $R_1 + \Delta R$ 代替上式中的 R_1，再以 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$以及

$$I_g = R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3R_4}{R_3 + R_4} = R \quad (1.2.1\text{-}40)$$

将(1.2.1-40）式代入（1.2.1-39）式并略去高阶小得：

$$I_g = \frac{V}{gR} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} = \frac{V}{8R} \cdot K \cdot \varepsilon_1 \quad (1.2.1\text{-}41)$$

②电压输出

当电桥输出端接放大器时，而放大器的输入阻抗高，即 $R_g \gg R_0$，电桥的输出端可视为开路状态，即只有电压输出，这样的电压称为电压桥。如图 1.2.1-10。

$$\Delta U = V\frac{R_4}{R_3 + R_4} - V\frac{R_2}{R_1 + R_2} = V\frac{R_1R_4 - R_2R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1.2.1\text{-}42)$$

电桥的平衡条件为 $\Delta U = 0$ 即$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$

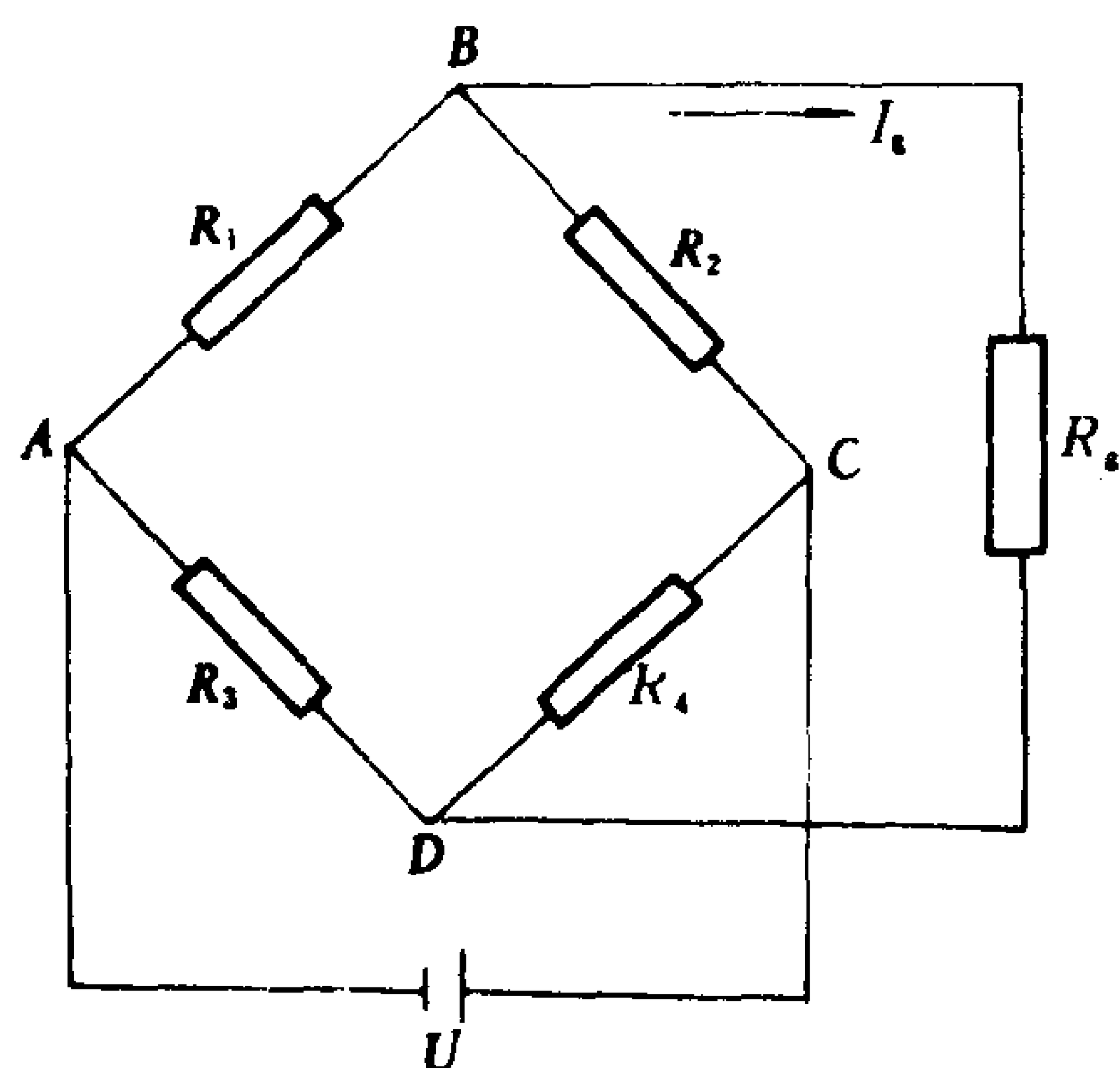


图 1.2.1-9　电流输出电桥电路

当 R_1产生 ΔR 的增量，并以 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时代入(1.2.1-42）式得：

$$\Delta U = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} = \frac{U}{4} \cdot K \cdot \varepsilon_1 \quad (1.2.1\text{-}43)$$

式(1.2.1-43）表明等臂电桥在一定应变范围内，输出电压与电阻增量 ΔR（或应变 ε）间近似呈线性关系。

③多个工作桥臂时电桥的输出

对于工作中 4 个桥臂都随被测量变化时，如图 1.2.1-11，即$R_1 + \Delta R_1$、$R_2 + \Delta R_2$、$R_3 + \Delta R_3$、$R_4 + \Delta R_4$。仍在全等臂，电压桥情况下讨论，电压桥的输出公式为：

$$\Delta U = U\frac{R_1R_4 - R_2R_3}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \tag{1.2.1-44}$$

将工作臂电阻分别产生的增量代入(1.2.1-44)式，并略去分母中的 ΔR 项及分子中 ΔR 的高次项，并考虑到电桥初始平衡条件 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$，则得:

$$\Delta U = \frac{V}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} - \frac{\Delta R_3}{R}\right)$$

$$= \frac{V}{4}K\ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \tag{1.2.1-45}$$

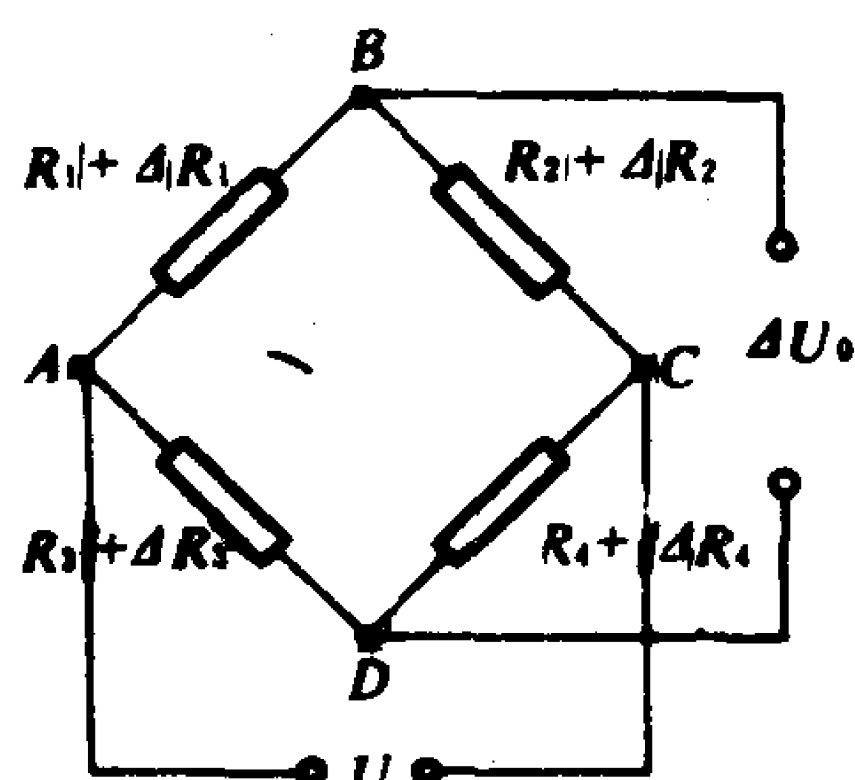


图 1.2.1-10　电压桥

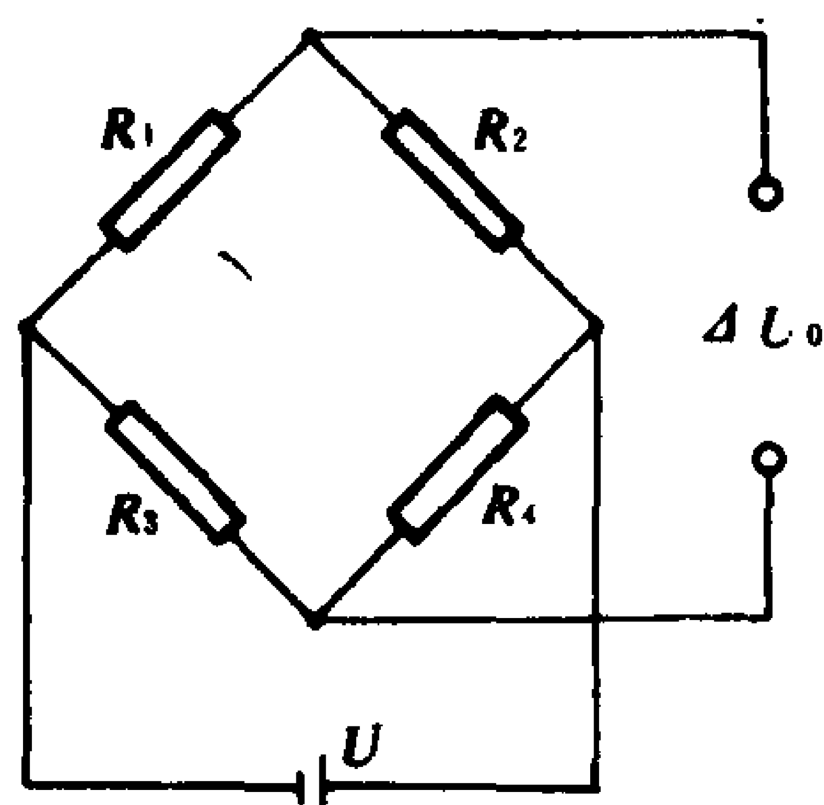


图 1.2.1-11　多个工作桥臂时的电桥

由式(1.2.1-45) 可说明

ⓐ当电桥 4 个桥臂都工作时，电桥的输出和 4 个臂的电阻变化率有关，输出电压 ΔU 与 $\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} - \frac{\Delta R_3}{R}$ 成正比，即在测量应变时，应变仪的总读数 ε 等于:

$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3$

ⓑ电桥相邻两臂有增量时，电桥输出反映两臂增量相减的结果，而相对两臂有增量时，电桥输出反映两臂增量相加的结果，即应变仪总读数是相邻两臂读数之差，相对两臂读数之和。

上述特性在实际应变测量中极为有用，它是温度补偿、复杂应力状态下所测得的单独由某一因素产生的应变，为提高电桥灵敏度等等作依据，利用这个特性可以达到测量上的许多目的。

（2）电桥的平衡调整

测量前，先使电桥平衡。对于直流电桥只考虑电阻平衡即可。对交流电桥，不仅对电阻进行平衡，还须进行电容平衡。

①电阻平衡

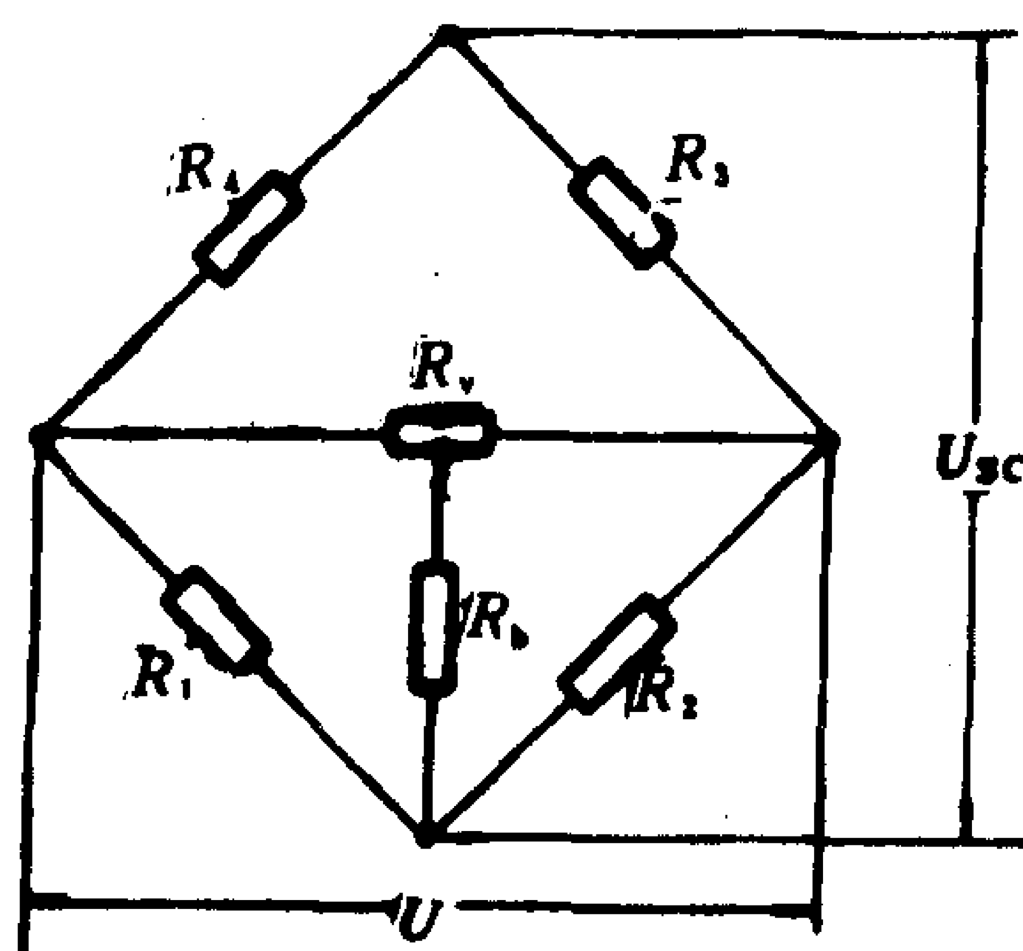


图 1.2.1-12　电阻调零电桥

电阻平衡一般用并联法，如图 1.2.1-12 所示，用改变 R_v 的中间触点位置来达到平衡的目的。调整零能力的大小取决于 R_b，当 R_b 小一些，调零能力就大一些。但太小时会给测量带来较大的误差，只能在保证测量精度的前提下，选得小一些。

②电容平衡

当电桥用交流供电时，导线间存在分布电容，相当于在应变片上并联一电容，如图 1.2.1-13 所示。此分布电容对电桥的性能有以下两方面影响。

ⓐ使电桥的输出电压比纯电阻电桥小。

ⓑ使电桥的输出产生一定的误差。

因此，交流供电的电桥必须有电容平衡装置。

图 1.2.1-13 b)，为常用的电容调整电路，由电位器 R_W 和固定电容器 C 组成。改变电位器上滑动触点的位置，以改变并联到桥臂上的电容串联而形成的阻抗相角，达到平衡条件。

另一种电容平衡法见图 1.2.1-13 c)，它是直接将一精密差动可变电容 C_2 并联到桥臂，改变其值以达到电容调零的目的。如利用 C_2 还不能达到零位平衡，可将固定电容 C_1(1000

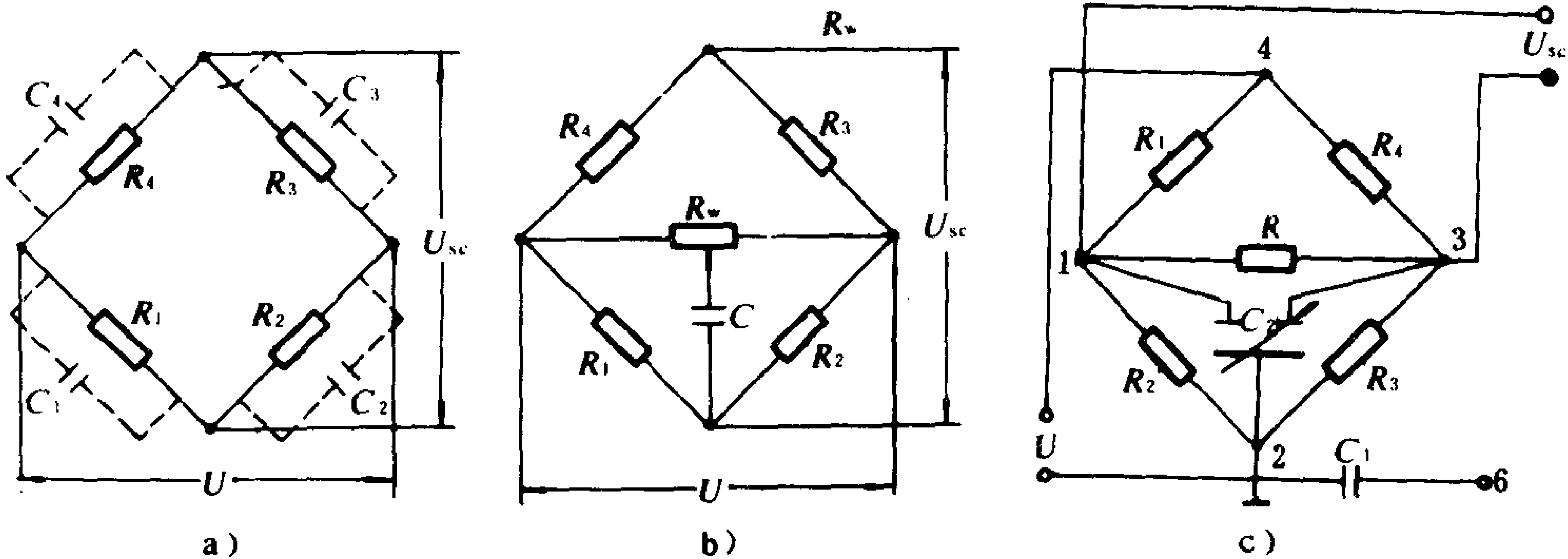


图 1.2.1-13 电容调零电桥

a) 分布电容；b) 电容调零法之一；c) 电容调零法之二

pF) 的 b 端，用短接片接到电桥的 1 或 3 点上。

2.1.2 电阻温度变换器

电阻温度变换器又称热电阻变换器。几乎所有物质的电阻率都随其本身温度的变化而变化，这一物理现象称为热电阻效应。利用这一原理制成的温度敏感元件（感温元件）称为热电阻或热敏电阻，它们大都是导体或半导体材料。利用电阻对温度的这种依赖关系，就可以将测非电量按一定的函数关系转换为电量。就可以用来检测表征电阻周围介质性质的各种非电量，如温度、浓度、密度……等，按热电阻的性质来分，可分为金属热电阻和半导体热电阻两大类，前者通常简称为热电阻，后者称为热敏电阻。

1)热电阻

纯金属是热电阻的主要制造材料，因为它易于复制且电阻温度系数较高。目前，应用最广的是铂和铜。

(1)铂电阻

铂电阻的特点是精度高，稳定性好，性能可靠，可在 0～650℃ 范围内测量温度。

(2)铜电阻

铂是贵金属，在一些测量精度要求不高且温度较低的场合，普遍地采用铜电阻，可用它来测量 −50℃ ～ +150℃ 的温度。铜电阻在上述温域内有很好的稳定性，较大的温度系数，其阻值与温度之间接近线性关系，而且易于提纯，价格低廉。其缺点是电阻率小。

2)热敏电阻

热敏电阻是利用半导体材料制作，它有许多优点：电阻温度系数大，形小体轻，热惯性小，结构简单，响应速度快，时间常数小(毫秒级)，寿命长等。半导体热敏电阻的缺点：测

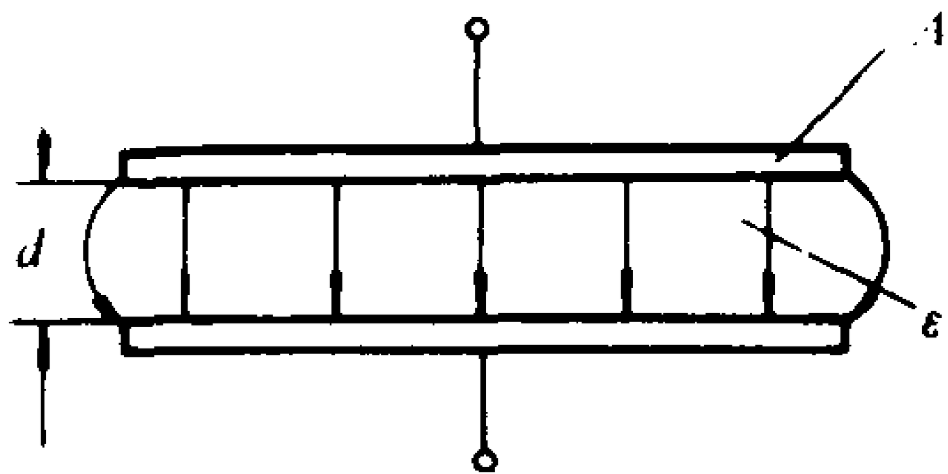


图 1.2.1-14　平板电容器

温上限不高，目前只适于 300℃ 以下使用。

2.2　电容式变换器

2.2.1　电容式变换器工作原理

电容器式变换器的基本工作原理，可以用图 1.2.1-14 所示的平板电容器来说明，当忽略边缘效应时，平板电容器的电容为

$$C=\frac{\varepsilon S}{d}=\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} \tag{1.2.1-46}$$

式中：S——极板相互遮盖面积，m^2；

d——两平行极板间的距离，m；

ε——极板间介质的介电常数；

ε_r——极板间介质的相对介电常数；

ε_0——真空的介电常数（$=8.85\times10^{-12}$F/m）。

由上式可见，电容器中有 d、S和 ε 三个参数影响电容 C，当改变这三个参数中的任意一个参数时，就可以实现电容量 C 的改变，这就是电容变换器的基本原理。

2.2.2　电容变换器的基本类型

1)改变遮盖面积 S 的类型

如图 1.2.1-15 所示，是这种变换器工作原理图，图 1.2.1-15a)是一个角位移式的结构，当动片有一角位移 Q 时，两极板的遮盖面积 S 就改变，因而改变了两极板间的电容量。

当 $Q=0$ 时

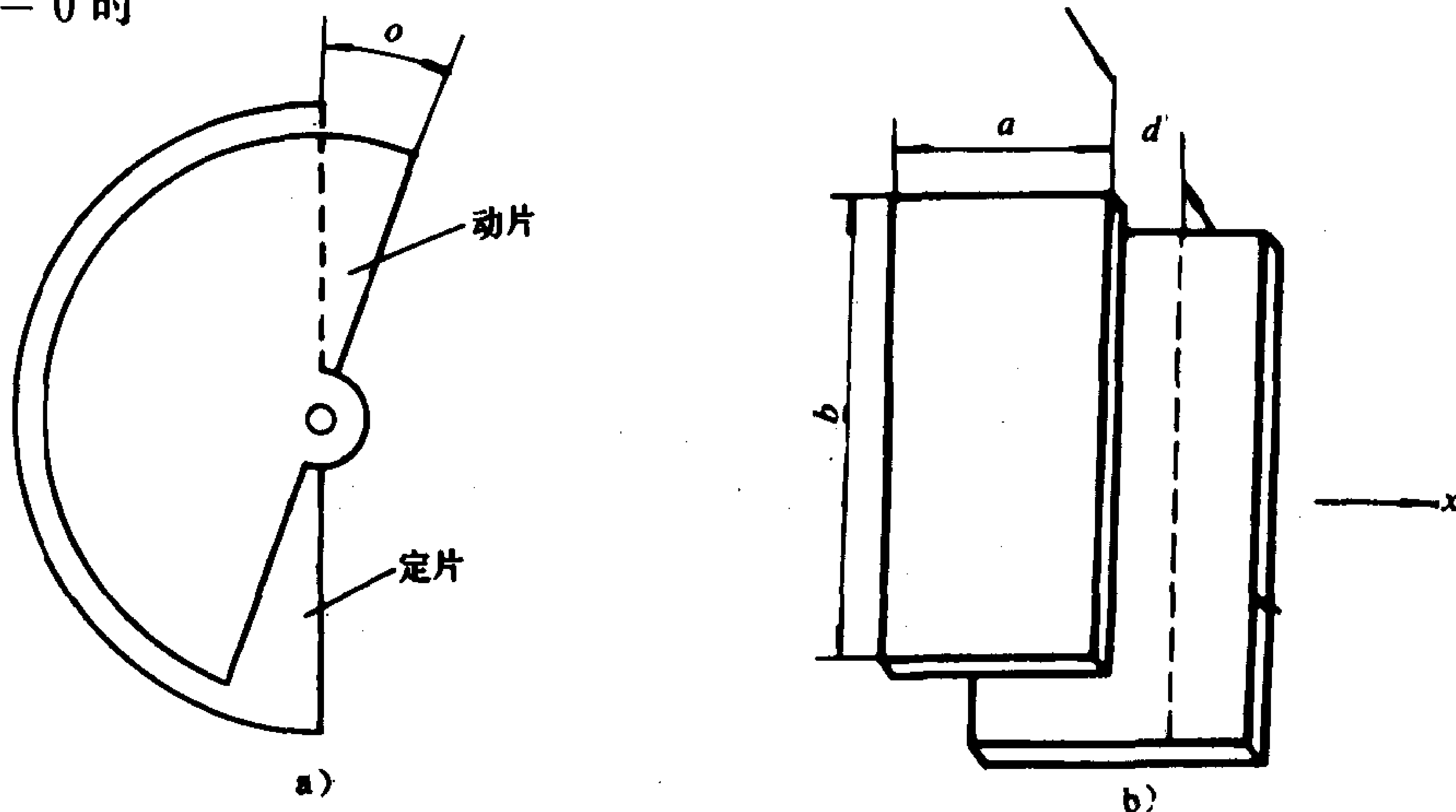


图 1.2.1-15　变 S 的电容传感器

a)角位移式；b)直线位移式

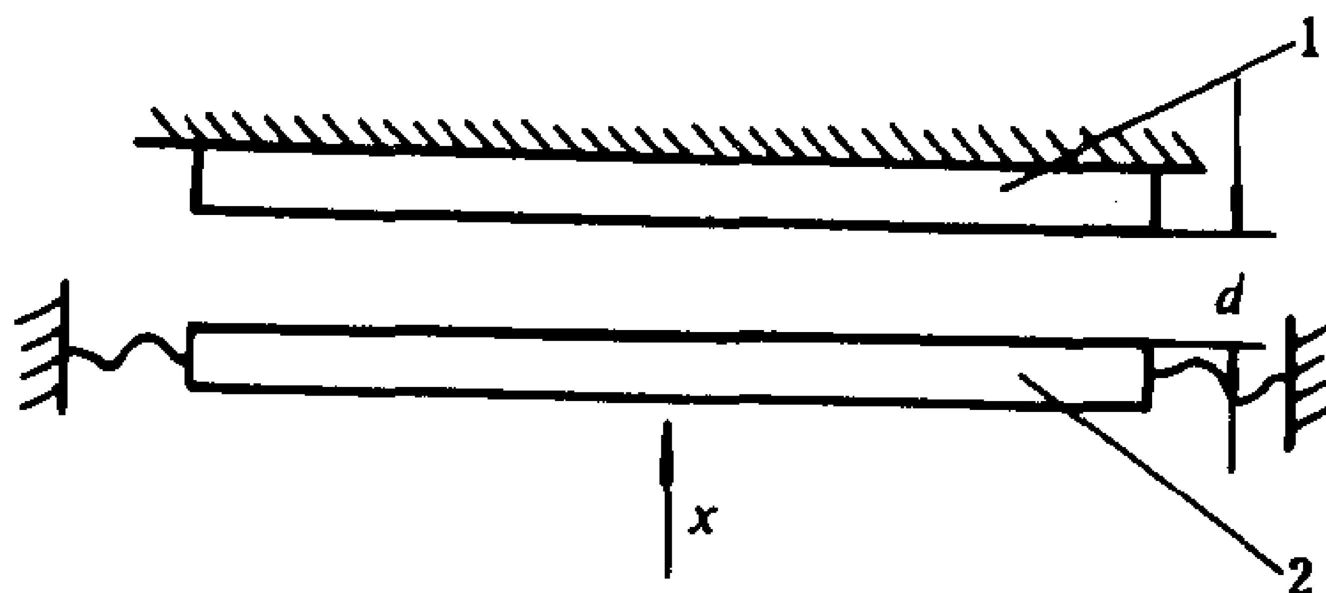


图 1.2.1-16　变 d 的电容传感器

1-不动极板；2-动片

$$C_0=\frac{\varepsilon s}{d} \qquad (1.2.1\text{-}47)$$

当 $Q\neq 0$ 时

$$C_Q=\frac{\varepsilon s\left(1-\frac{Q}{\pi}\right)}{d}=C_0\left(1-\frac{Q}{\pi}\right) \qquad (1.2.1\text{-}48)$$

可见，这种形式变换器，电容 C_Q与角位移 Q 间成线性关系。

图 1.2.1-15 b）是一个直线位移式的结构，当其中一块沿 x 方向移动时，S 值发生变化，电容量 C 也随之改变

$$C_x=\frac{\varepsilon b\,(a-x)}{d}=C_0\left(1-\frac{x}{a}\right) \qquad (1.2.1\text{-}49)$$

式中：$C_0=\frac{\varepsilon ba}{d}$

这种保持间隙恒定，改变极板间有效工作面积的类型，在灵敏度要求不高时，它可以在相当宽的范围内获得线性输出，因而被广泛地用于测量角度或机械位移的电容变换器。

2）改变极板之间距离 d 的类型

如图 1.2.1-16，是这种变换器的原理图

图中极板 1 是固定不变的，极板 2 为可动的，一般称为动片，当动片 2 在外力作用下由极板间距初始值 d_0，移动 Δd 时，则对应于 d_0和$d_0-\Delta d$ 下的电容量分别为 C_0和C_1，

$$C_0=\frac{\varepsilon s}{d_0} \qquad (1.2.1\text{-}50)$$

$$C_1=\frac{\varepsilon s\left(1+\frac{\Delta d}{d_0}\right)}{d_0}=C_0+C_0\frac{\Delta d}{d_0} \qquad (1.2.1\text{-}51)$$

可见，这种改变极板间距离 d 的电容变换器，适于在 Δd 变化很小的范围内工作，以保证 C_1 与 Δd 近似显线性关系。

3）改变介质介电常数 ε 的类型

因为各种介质的介电常数不同，在两电极间加以空气以外的其它介质，当它们之间的介电常数发生变化时，就可改变它的电容量，这种变换器可用来检测容器中的液面高度，或者片状材料的厚度等，如图 1.2.1-17 所示，为电容液面计的原理图，在被测介质中放入两个极板 1 和 2，若容器内介质的介电常数为 ε_1，容器介质上面的气体的介电常数为 ε_2，当容器内液面变化时，两极板间的电容量 C 就会发生变化。

假定容器中介质是非导电的（如果液体是导电的，则电极需要绝缘），当介质浸没电极的高度为 x，这时总的电容为极板在空气中的一部分电容 C_1 与在液体中的一部分电容 C_2 之和。

气体介质间的电容量 C_1 为：

$$C_1=\frac{\varepsilon_2\cdot b\,(L-x)}{d} \qquad (1.2.1\text{-}52)$$

液体介质间的电容量 C_2 为

$$C_2=\frac{\varepsilon_1 bx}{d} \qquad (1.2.1\text{-}53)$$

式中：ε_1——液体介质的介电常数；

ε_2——气体介质的介电常数；

L——电极总长度；

x——液体介质高度。

$$C=C_1+C_2=\frac{\varepsilon_2 b\ (L-X)}{d}+\frac{\varepsilon_1 bx}{d}$$

$$=\frac{\varepsilon_2 bL+bx\ (\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{d}=A+Bx \tag{1.2.1-54}$$

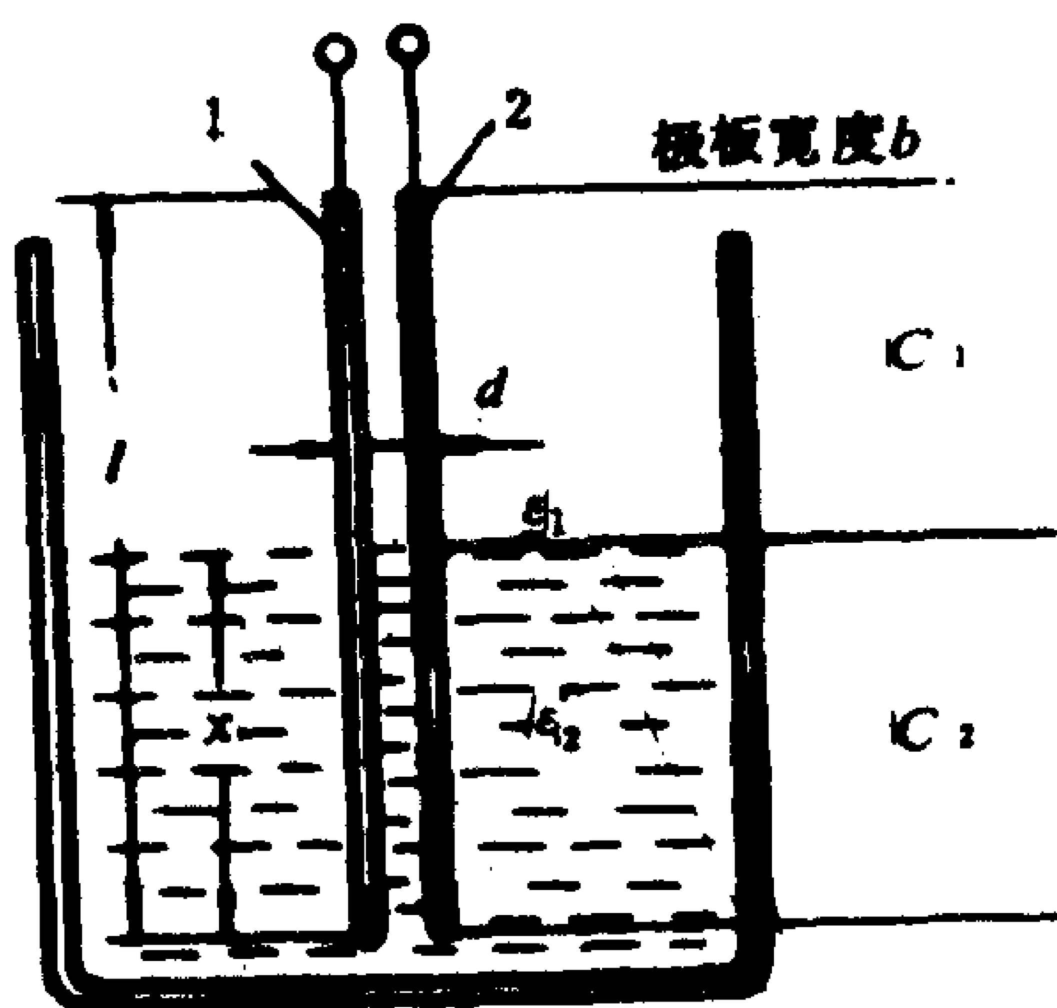


图 1.2.1-17 电容液面计原理图

式中：$A=\frac{\varepsilon_2 bL}{d}$；　　$B=\frac{b\ (\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{d}$。

可见，电容量 C 与液面高度 x成比例关系。

4)差动式电容变换器

在实际应用中，为了提高变换器的灵敏度，以及克服电源、电压和环境温度等因素对测量精度的影响，常在结构上采用对称配置的差动式电容变换器如图 1.2.1-18，用交流电桥测量输出，图中，中间一片为动片，两边是定片，当动片移动距离 Δd 后，一边的间距变为 $d+\Delta d$，另一边变为 $d-\Delta d$，即电容为差动变化。

当动片在外力作用下产生位移 Δd 时，其电容量分别为：

$$C_1=\frac{\varepsilon s}{d-\Delta d}\qquad C_2=\frac{\varepsilon s}{d+\Delta d}$$

当$\Delta d\ll d$时，则

$$\Delta C=C_1-C_2=2\ C_0\frac{\Delta d}{d} \tag{1.2.1-55}$$

这种差动式电容变换器与适当的测量电路配合后，当 $\Delta d/d$ 在±33%的范围内时，其输出特性偏离直线的误差不超过 1%，可见既扩大了线性范围，并且比单组式变换器的灵敏度也提高了一倍。

2.2.3 测量电路

电容变换器在实际应用中，可以接在不同的测量电路中，主要有桥式电路，调频电路，谐调电路。

1)桥式电路

图 1.2.1-19 为桥式测量电路。图 1.2.1-19 a)，为单臂接法的桥式测量电路，高频电源经变压器接到电容桥的一个对角线上，电容 C_1，C_2，C_3，C_x 构成电容桥的四臂，C_x 为电容传感器，交流电桥平衡时。

$$\frac{C_1}{C_2}=\frac{C_x}{C_3}\qquad V_{sc}=0$$

当 C_x 改变时，　$U_{sc}\neq 0$ 有输出电压。此种电路常用于自动料位测量仪中。

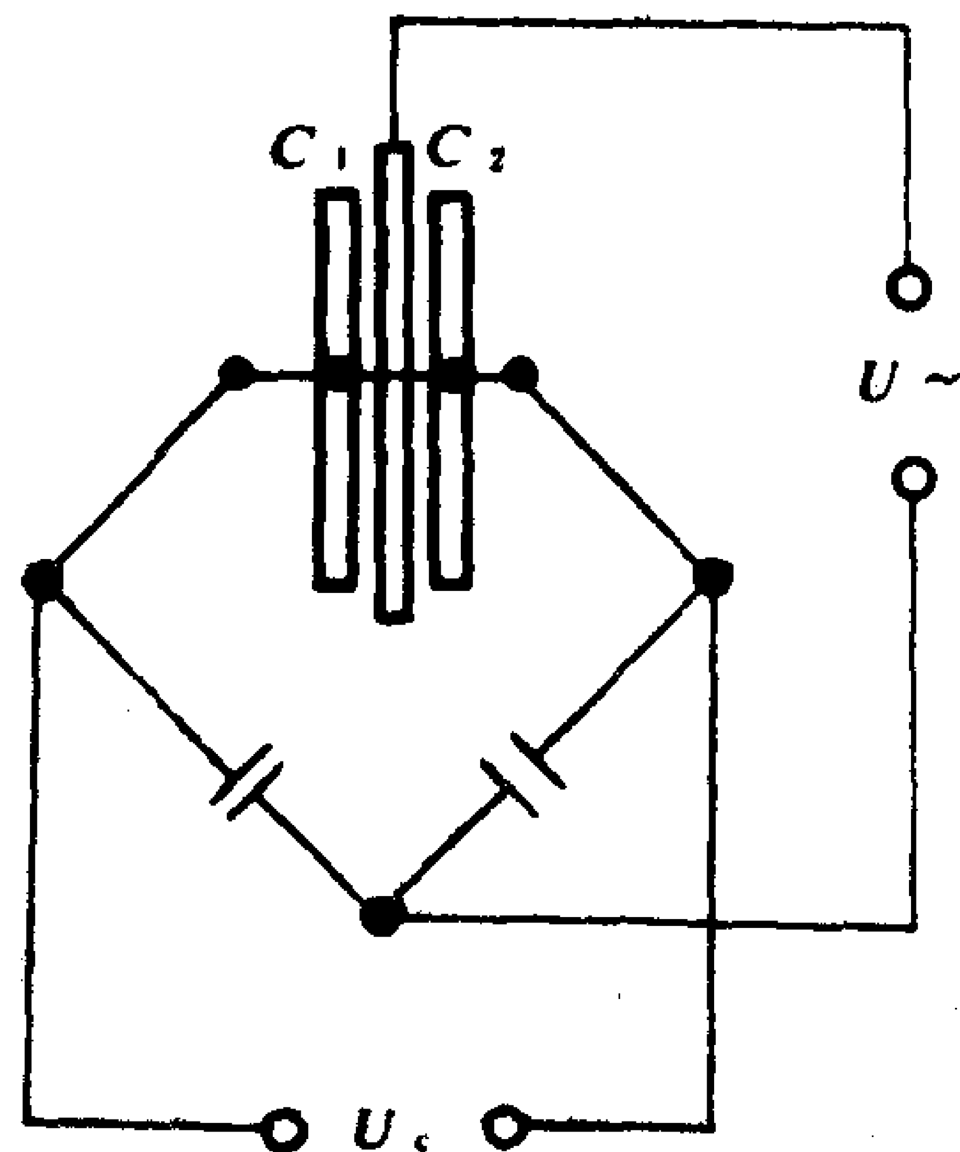


图 1.2.1-18 差动式电容

在图 1.2.1-19b)的电路中，接有差动电容传感器，其空载输出电压可用下式表示：

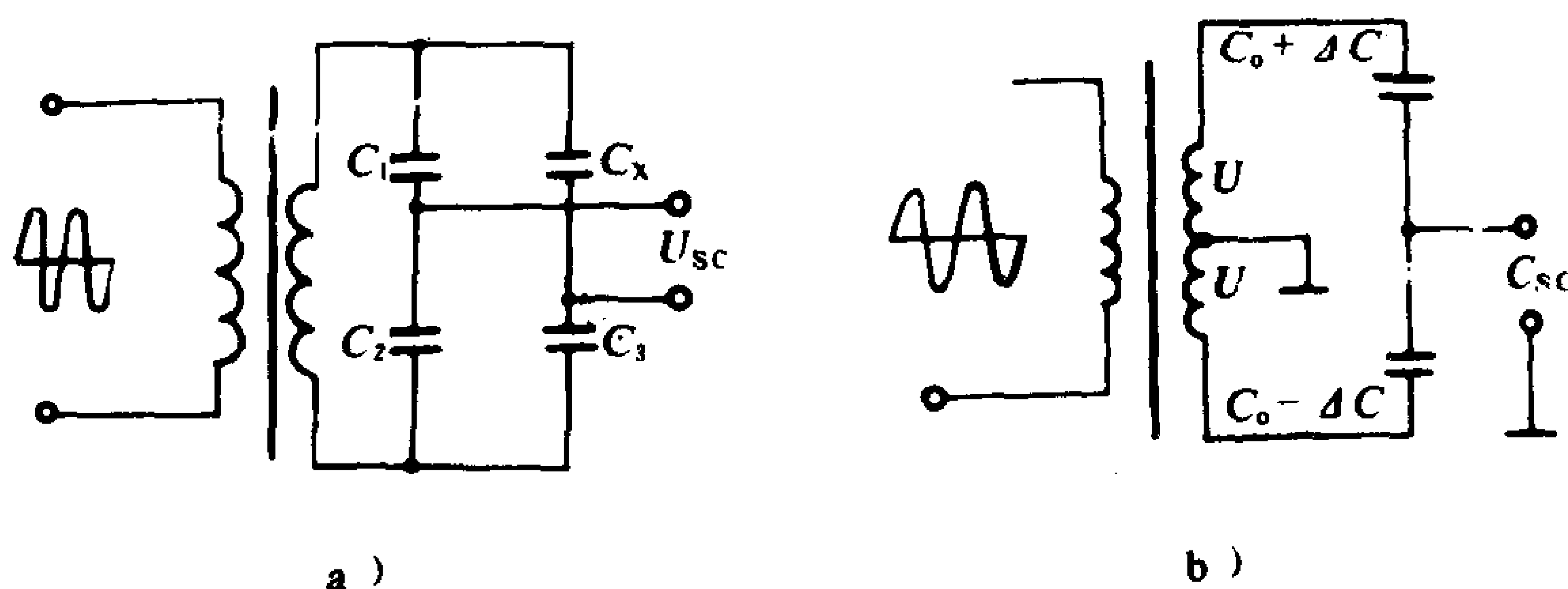


图 1.2.1-19 电容传感器的桥式电路
a)单臂接法；b)差动接法

$$V_{sc}=\frac{(C_0-\Delta C)-(C_0+\Delta C)}{(C_0+\Delta C)+(C_0-\Delta C)}V=-\frac{2\Delta C}{2C_0}V=-\frac{\Delta C}{C_0}V \qquad (1.2.1\text{-}56)$$

式中：V——工作电压；

C_0——电容变换器平衡状态的电容值；

ΔC——电容变换器的电容变化值。

2)调频电路

在电容变换器的测量电路中，目前广泛采用调频电路。如图 1.2.1-20，是直接调频法的框图，它是利用被变换器变换成电容，电感或电压的被测信号 u_r，直接控制振荡回路的谐振频率，从而获得调制信号。

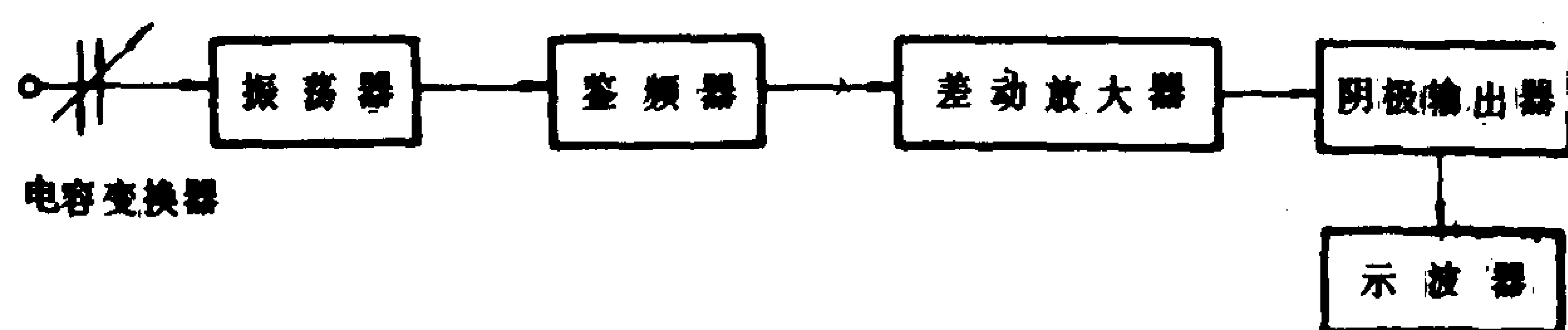


图 1.2.1-20 调频式电容测量系统方框图

这种频率调制电路的主振器采用 LC 高频振荡器，它的振荡频率主要决定于回路电容和电感的数值，因此，只要用电容变换器，电感变换器，代替或部分代替回路中的 L 或 C，就能获得直接调频。此频率变化在经过鉴频和滤波后变换为和频率成一定函数关系的直流电压，然后再经过放大后就可用指示器指示或记录器记录下来。

调频电路的优点是抗干扰能力强，特性稳定，并能取得高电频的输出信号。

3)谐振电路

这是利用电容与电感并联回路调谐在某一谐振频率附近时，谐振电压与电容变化近似线性关系的原理来测量电容量的一种方法，图 1.2.1-21，是其测量系统的方框图。电容变换器

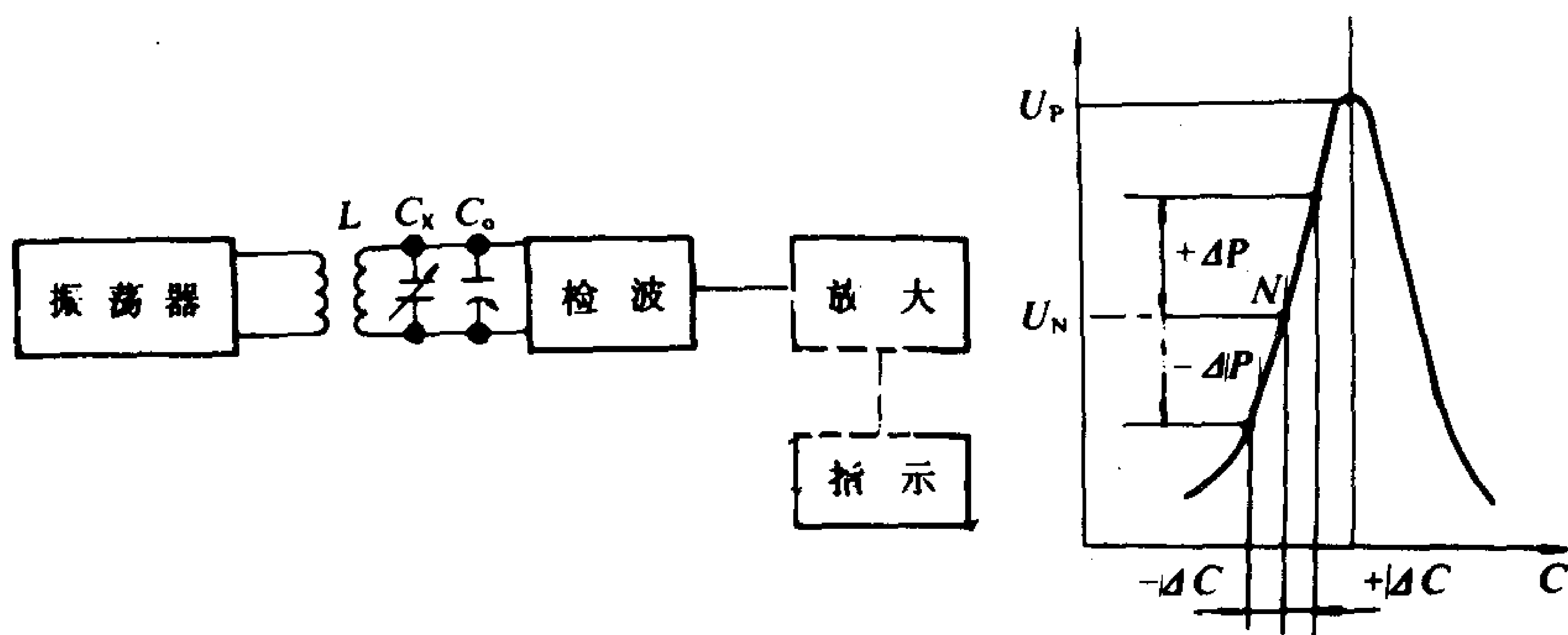


图 1.2.1-21 谐振式测量系统原理图

C_x，作为谐调回路调谐电容器，与它并联的线圈 L 通过电感耦合从振荡器中获得振荡电压，当 C 置中间位置时，调整电容 C_o 使回路工作在谐振频率附近，使输出电压近于谐振电压 V_P 一半附近的位置上，即工作在谐振曲线的拐点 N 处，这样，当电容变换器的电容量 C_x 变化 $\pm\Delta C$ 时，它与输出电压 $V_N\pm\Delta P$ 呈近似线性的变化，并且具有较高的灵敏度。

这种测量系统的特点是：灵敏度较高，电容的变化范围小，并且要求尽可能的使传感器与谐振电路靠近在一起，以减小杂散电容对测量电路的影响。同时，为保证一定的测量精度，振荡器的频率稳定性一般需保持在 10^{-6} 的数量级。

2.3 电感式变换器

电感式变换器是建立在电磁感应基础上，利用线圈自感和互感的变化实现非电量转换成电量的一种装置。把被测机械量，如位移、速度、加速度和振动等的变化转换为磁路中的自感系数 L 或互感系数 M 的变化，再将变化的 L 或 M 引入一定的测量电路后，便可得到相应的电信号以实现对被测机械量的测定。

2.3.1 自感变换器

自感式变换器常用有变隙式、螺管式、差动式三种结构。

1）变隙式电感变换器

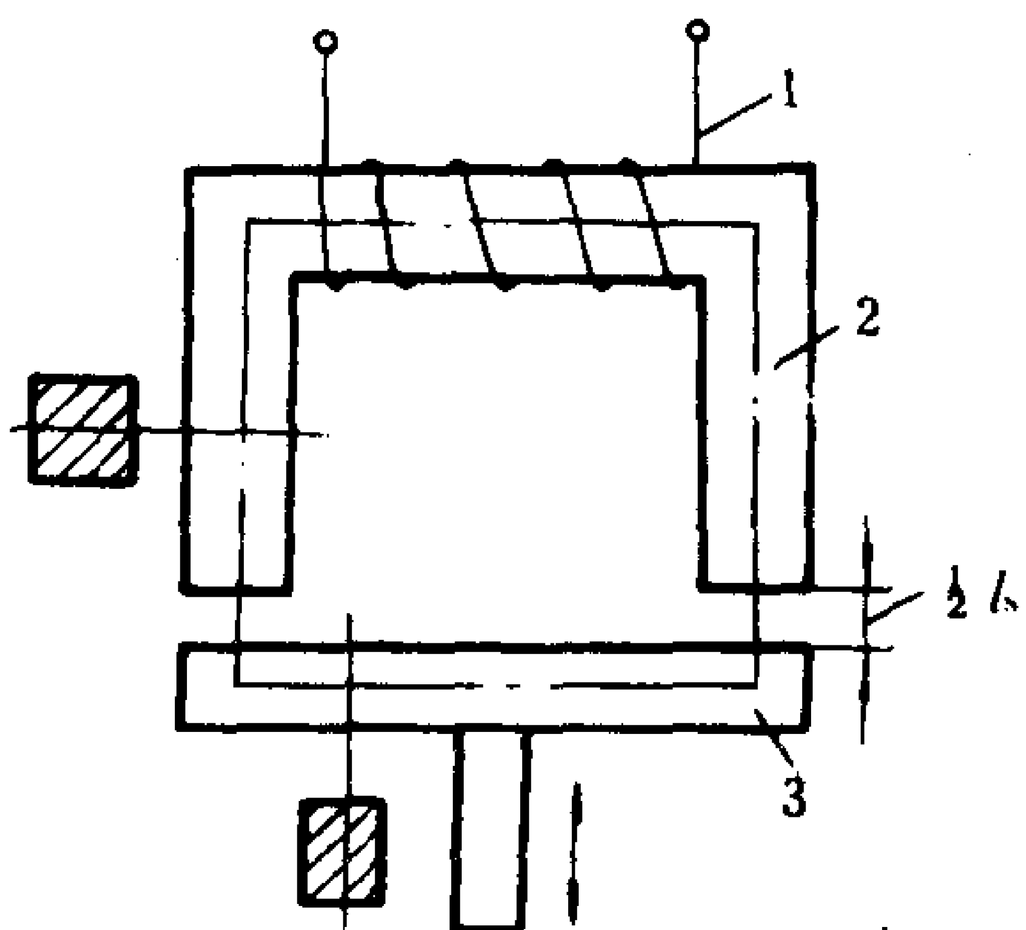


图 1.2.1-22 变隙式传感器原理图
1-线圈；2-铁芯；3-衔铁

图 1.2.1-22 是变隙式电感变换器的原理图

变换器主要由线圈、衔铁和铁芯等组成。并由固定频率和电压的交流电源供给线圈。衔铁为变换器的可动部分，当它产生位移时，使气隙长度 l_d 产生变化，因而使线圈的电感 L 和线路中的电流发生变化，线路中的电流变化则由电流计式示波器指示与记录。

电磁路基本知识可知，线圈电感为

$$L=\frac{W^2\mu_0 A}{l_d} \tag{1.2.1-57}$$

式中：W——线圈匝数；

A——气隙磁通截面积；

μ_0——真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\mathrm{H/m}$；

l_d——气隙总长度。

此时，电感 L 是气隙截面 A 和长度 l_d 的函数，即 $L=f(A,l_d)$ 如果将 A 保持不变，则 L 为 l_d 的单值函数，可构成变隙式变换器，若保持 l_d 不变，使 A 随位移而变，则可构成变截面式电感变换器，其结构示意图见图 1.2.1-23。

根据式(1.2.1-57)，作出简单电感变换器的特性曲线如图 1.2.1-24，图中直线 $L=f(A)$

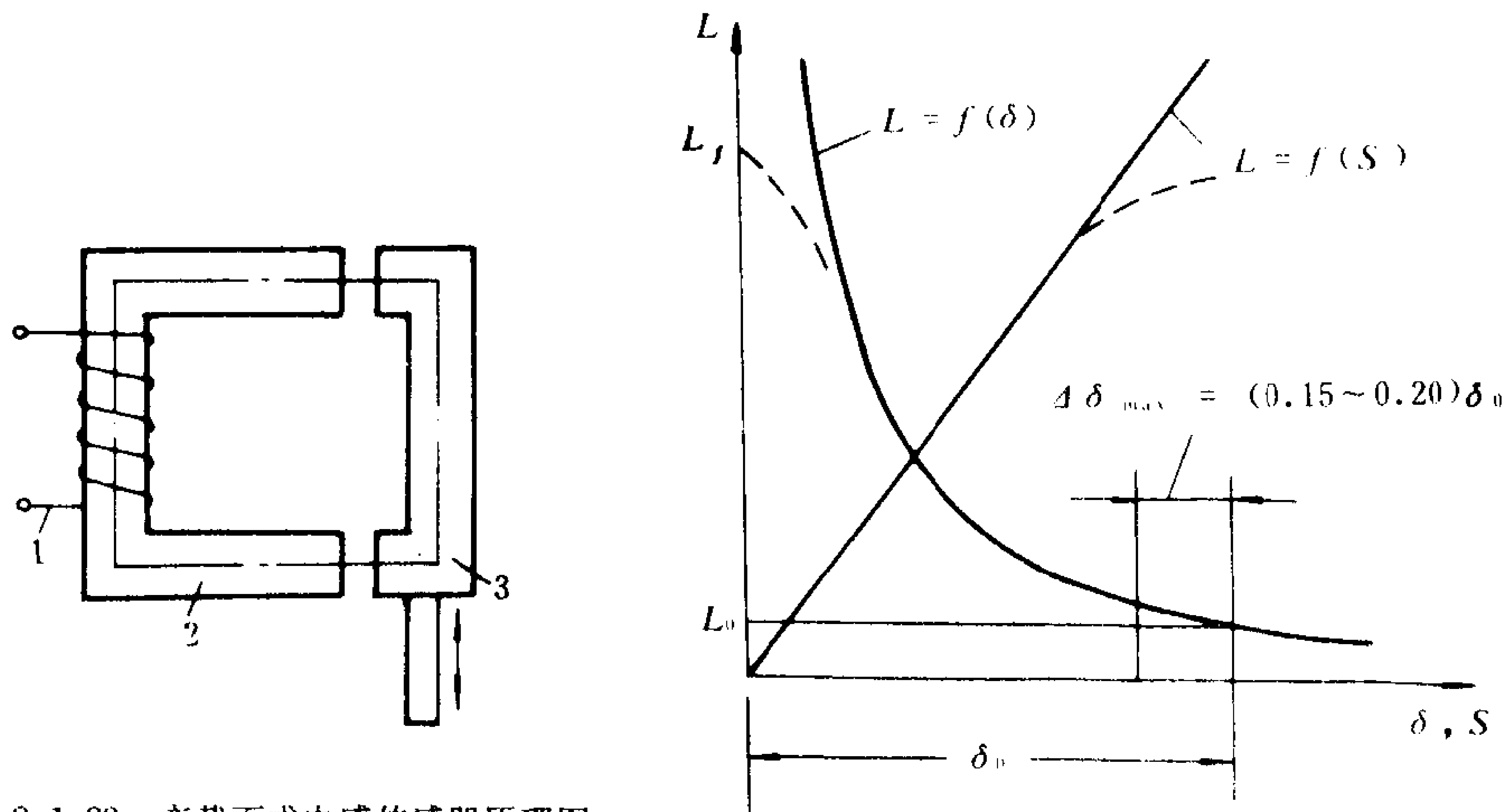


图 1.2.1-23　变截面式电感传感器原理图
1-线圈；2-铁芯；3-衔铁

图 1.2.1-24　电感变换器的特性

表示电感 L 的变化与气隙截面 A 的改变成线性关系。$L=f(l_d)$ 表示电感与气隙总长度 l_d 的变化不是线性的，当 l_d 为零时 $L=\infty$，如果考虑到导磁体的磁阻，则 $l_d=0$ 时，L 并不等于 ∞，而有一定的数值。从以上分析可以看出：

(1)不论气隙减小或增加，电感的变化与气隙变化均是非线性关系，其非线性程度，随气隙相对变化 $\Delta l_d/l_d$ 的增大而增加。

(2)气隙减小 Δl_d 所引起的电感变化 ΔL_1 与气隙增加同样 Δl_d 所引起的电感变化 ΔL_2 并不相等 $\Delta L_1>\Delta L_2$，ΔL_1 和 ΔL_2 的差值也随 $\Delta l_d/l_d$ 增加变化。

为了保证一定的线性精度，它只能工作在一段很小的区域，因而只能用于微小位移的测量。

2)螺管式电感变换器

螺管式电感变换器，在螺管线圈的中心部分插入一个衔铁构成这种变换器，它的作用原理是基于线圈泄漏路径中的磁阻变化。线圈的电感 L 和衔铁伸入的深度在较大范围内呈线性关系。这种型式的电感变换器，如图 1.2.1-25。其优点是结构简单，制作容易，由于它的磁阻较大因而灵敏度低，这一缺点可在电路中加以解决。

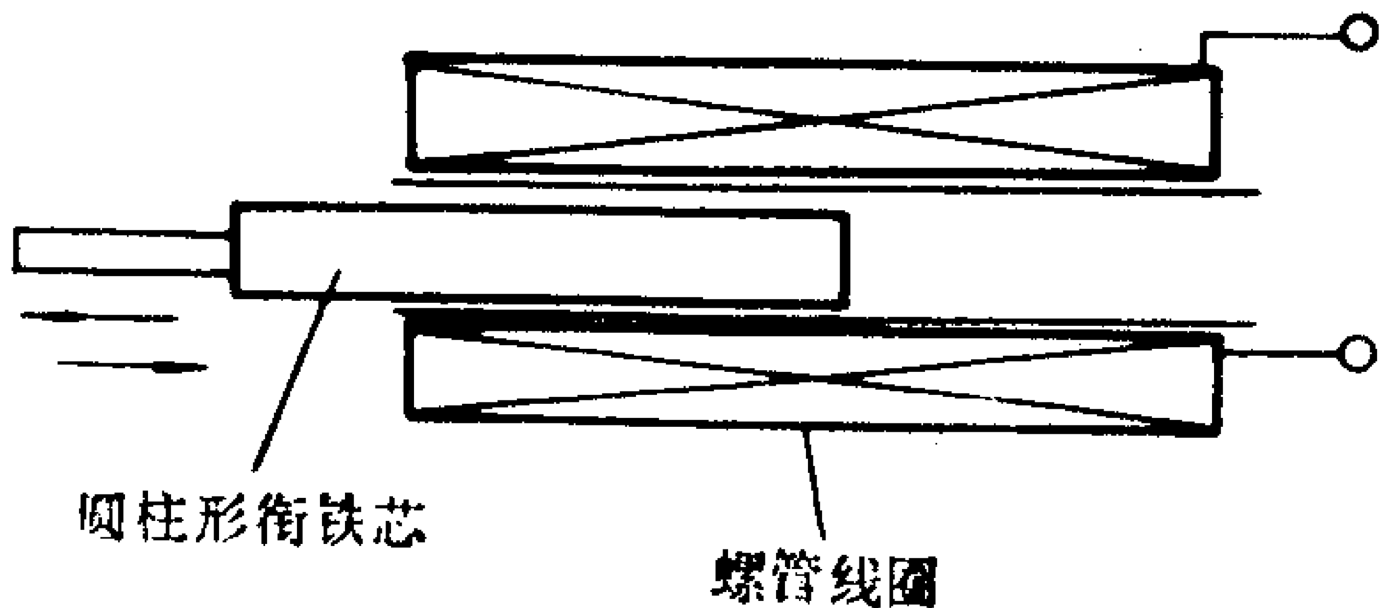


图 1.2.1-25　螺管式电感变换器

螺管式电感变换器也有单线圈和差动式两种结构形式。

3)差动式电感变换器

上述的简单电感变换器虽然结构简单，运用方便，但也有许多缺点，如流经线圈的负载电流不可能等于零，衔铁始终

受到吸力的作用；线圈电阻有温度误差，不能反映极性等。因此在实际中用得较少，而多数是采用差动式电感变换器。

差动式电感变换器是将有公共衔铁的两个相同简单电感变换器组合而成。如图 1.2.1-26 所示。

当衔铁处于中间位置时(即衔铁的位移为零)，两线圈电感相等，$L_1=L_2$，则 $I_L=I_{L_1}-I_{L_2}=0$。当衔铁有位移时，则一侧磁路中的气隙增大，另一侧磁路中的气隙减小，从而使两个线圈的电感值不等，$L_1\neq L_2$，则 $I_L=I_{L_1}-I_{L_2}\neq 0$，此 I_L 的大小即表示衔铁的位移量。又由于衔铁位移的方向不同，输出电流方向也不同，这样根据输出电流的大小和极性，就可以反映出位移的大小和方向。

由于差动式电感变换器是由两个简单电感变换器组合而成，这样就可以由 $L_1=f_1(l_d)$ 和 $L_2=f_2(l_d)$ 作出 $L_1-L_2=f_3(l_d)$ 的差动电感变换器的特性曲线，如图 1.2.1-27 所示。从而增加了衔铁工作行程的线性范围。一般对差动变隙式电感变换器 $\Delta l_d/l_d=0.1\sim0.2$ 时，可使变换器非线性误差在 3％左右。

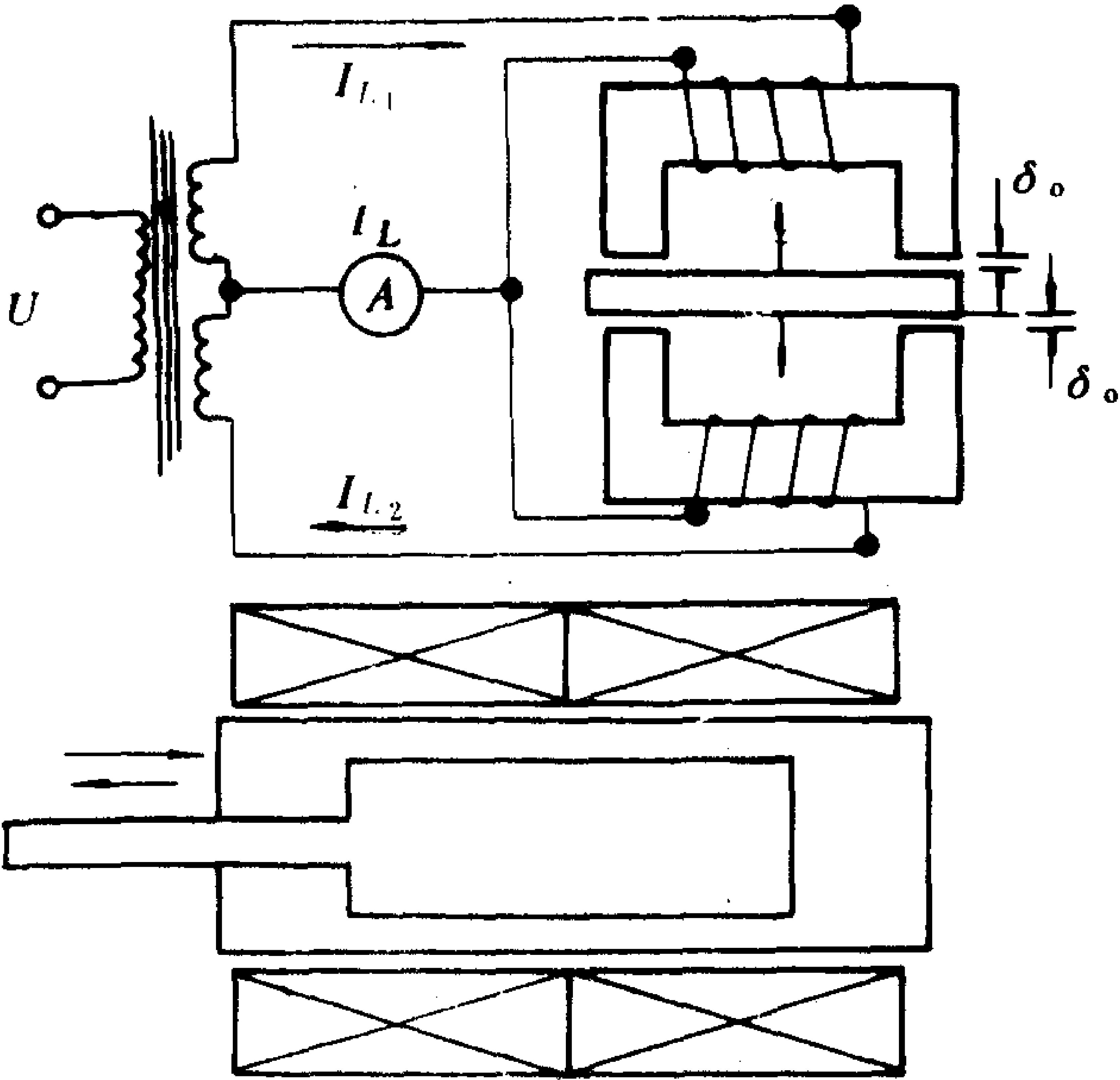


图 1.2.1-26　差动式电感变换器

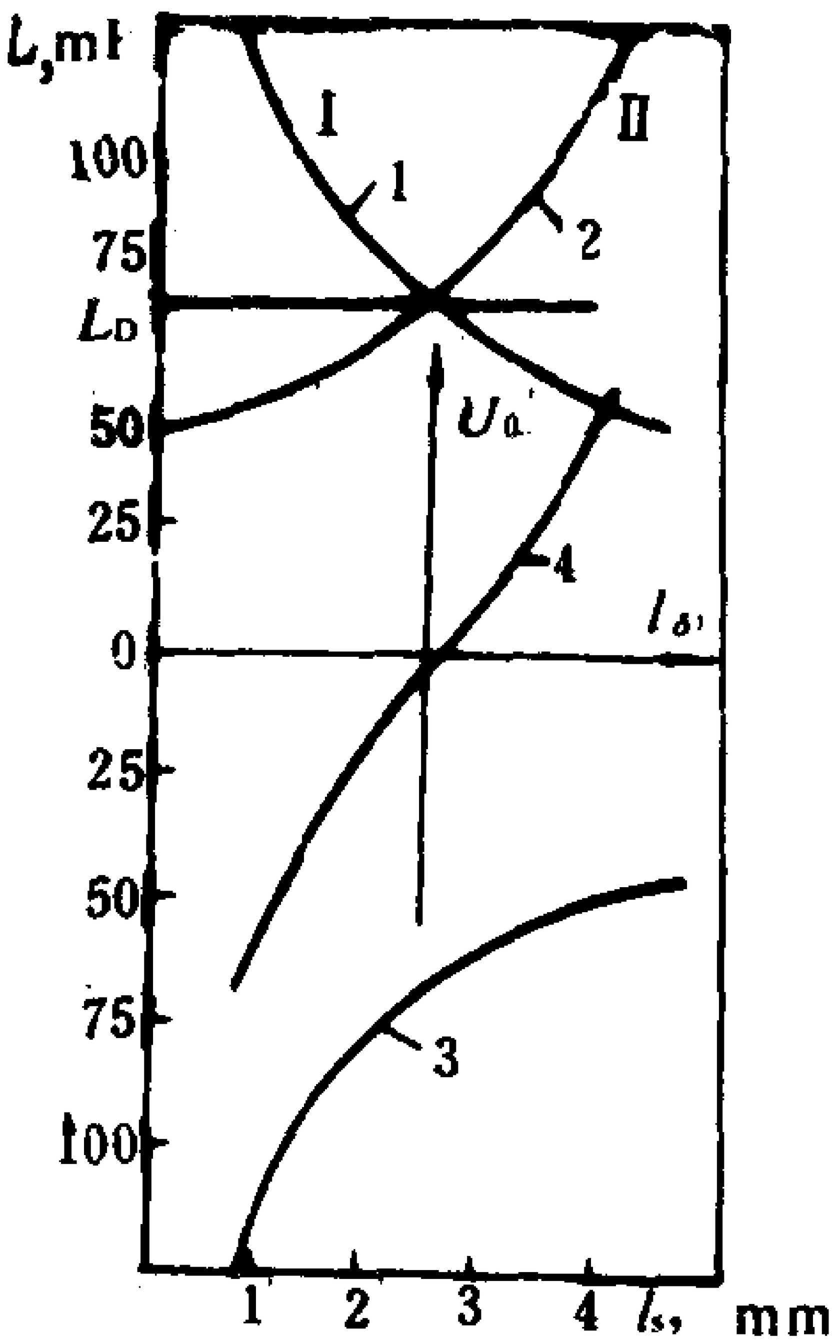


图 1.2.1-27　差动电感传感器的电压输出特性
1-线圈I的电感特性；2-线圈 II 的电感特性；3-线圈 I 与线圈II差接时的电感特性；4-两线圈差接后电桥电压与位移间的特性曲线

4)测量电路

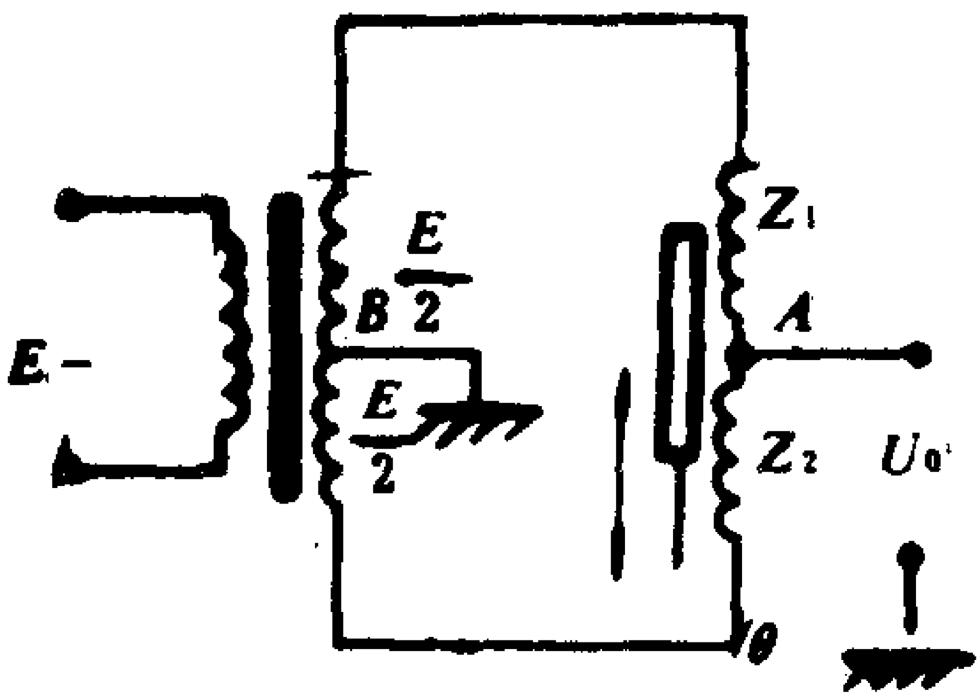


图 1.2.1-28　差动电桥

电感变换器测量电路的作用，是将电感变换器的电感变化变换成电压或电流的信号，进行放大后用仪表指示或记录。

图 1.2.1-28 是用差动螺管式电感变换器的电桥电路，电桥由交流电源 E 供电。电源的频率应为被测量频率的 10 倍以上，以满足变换器动态频率响应的要求。供桥电源频率高一些可以减少变换器受温度变化的影响，以提高变换器的输出灵敏度，但相应增加了铁芯损耗和寄生电容的影响。

电桥的两臂 Z_1 和 Z_2 为变换器中电感线圈的阻抗

（电感 L 和导线电阻 r 的串联）。另两臂各为电源变压器次级线圈的一半（每个电势为E/Z）电桥对角线上 A、B 两点的电位差为输出电压U_0。假定 O 点电位为零。

则 A、B两点的电位差，即输出电压 V_0为

$$V_0=V_A-V_B=\left(\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}-\frac{1}{2}\right)E \tag{1.2.1-58}$$

当变换器的衔铁处于中间位置时，两线圈的电感相等，若两线圈绕制完全对称，则 $Z_1=Z_2=Z$（Z 表示衔铁处于中间位置时每一线圈的阻抗），此时，从式（1.2.1-58）得 $V_0=0$ 即电桥处于平衡，无电压输出。

当衔铁向下移动时，下面线圈的阻抗增加，即 $Z_1=Z+\Delta Z$，而上面线圈的阻抗减少，即将 $Z_2=Z-\Delta Z$，代入式（1.2.1-58）得：

$$V_0=\left(\frac{Z+\Delta Z}{2Z}-\frac{1}{2}\right)E=\frac{\Delta Z}{2Z}E \tag{1.2.1-59}$$

反之，当衔铁上移同样大小的距离时，即 $Z_1=Z-\Delta Z$，$Z_2=Z+\Delta Z$ 代入式(1.2.1-58)得

$$V_0=\left(\frac{Z-\Delta Z}{2Z}-\frac{1}{2}\right)E=-\frac{\Delta Z}{2Z}E \tag{1.2.1-60}$$

比较式(1.2.1-59)与式(1.2.1-60)，可知两者输出电压大小相等、相位相反。式中 V_0 表示为输出端的空载输出电压(交流)，经相敏整流后，可用直流电表指示出位移的大小和方向。

2.3.2 差动变压器

差动变压器是互感变换器，它把被测量位移变换为变换器的互感(互感系数)，本身就是一个变压器，在初级线圈接入电源后，其次级即感应产生电压输出。当互感变化时，输出电压作相应的变化。由于这种变换器常常做成差动的，故称为差动变压器。目前，采用的形式大多为螺管式。

1)工作原理

差动变压器主要由一个线框和一个铁芯组成。在线框上绕有一组初级线圈作为输入线圈（或称一次线圈）在同一线框上另绕两组次级线圈作为输出线圈（或称二次线圈），并在线框中央圆柱孔中放入铁芯，如图 1.2.1-29 所示。当初级线圈加以适当频率的电压激励时，根据变压器的作用原理，在两个次级线圈中就会产生感应电势。当铁芯向右移动时，在次级线圈 2 内所穿过磁通比次级线圈 1 多些，所以互感也大些，感应电势 e_1 增加，另一个线圈的感应电势 e_2 随铁芯向右偏离中心位置而逐渐减小，并减小到接近空心状态时的电势 e_0，如图 1.2.1-30 a)所示，两个次级线圈的输出电压分别为 U_{z1} 和 U_{z2}（空载时即为感应电势 e_1 和 e_2）如果输出接成反向串联如图 1.2.1-29 a）所示，则此变换器的输出电压 $U_2=U_{z1}-U_{z2}$，因为两个次级线圈做得一样，因此当铁芯在中央位置时$U_2=0$，当铁芯移动时 U_2 就随铁芯位移 x 成线性的增加。其特性如图 1.2.1-30 b） 所示，形成 V 字形特性，如果以适当的方法测量 U_2，就可以得到与 x 成比例的线性读数。

2)测量电路

对于差动变压器最常应用的测量电路是差动整流电路，如图 1.2.1-31 所示，把两个次级电压分别整流后，以它们的差为输出端 ab，这样，次级电压的相应和零点残余电压都不必考虑。

图 1.2.1-31 中a） 和b） 用在连结低阻抗负载的场合，是电流输出型，图c） 和 d）用

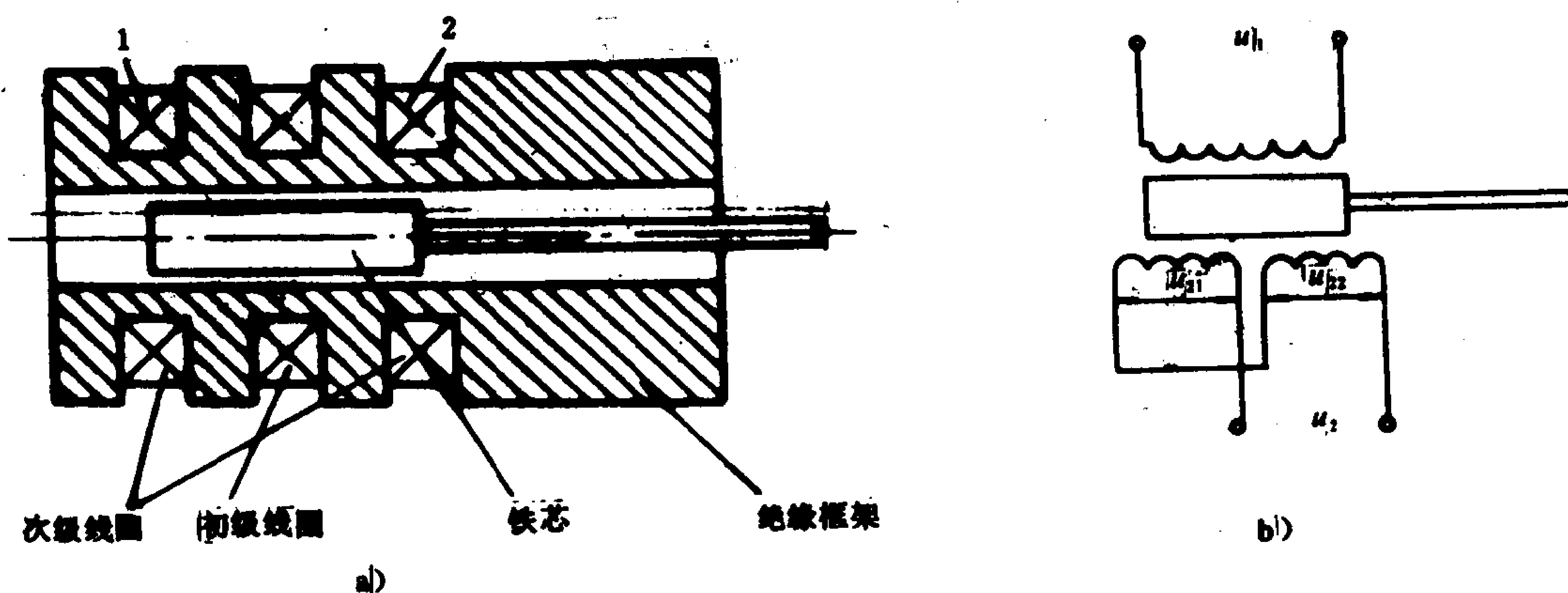


图 1.2.1-29 差动变压器
a)结构图；b)原理图

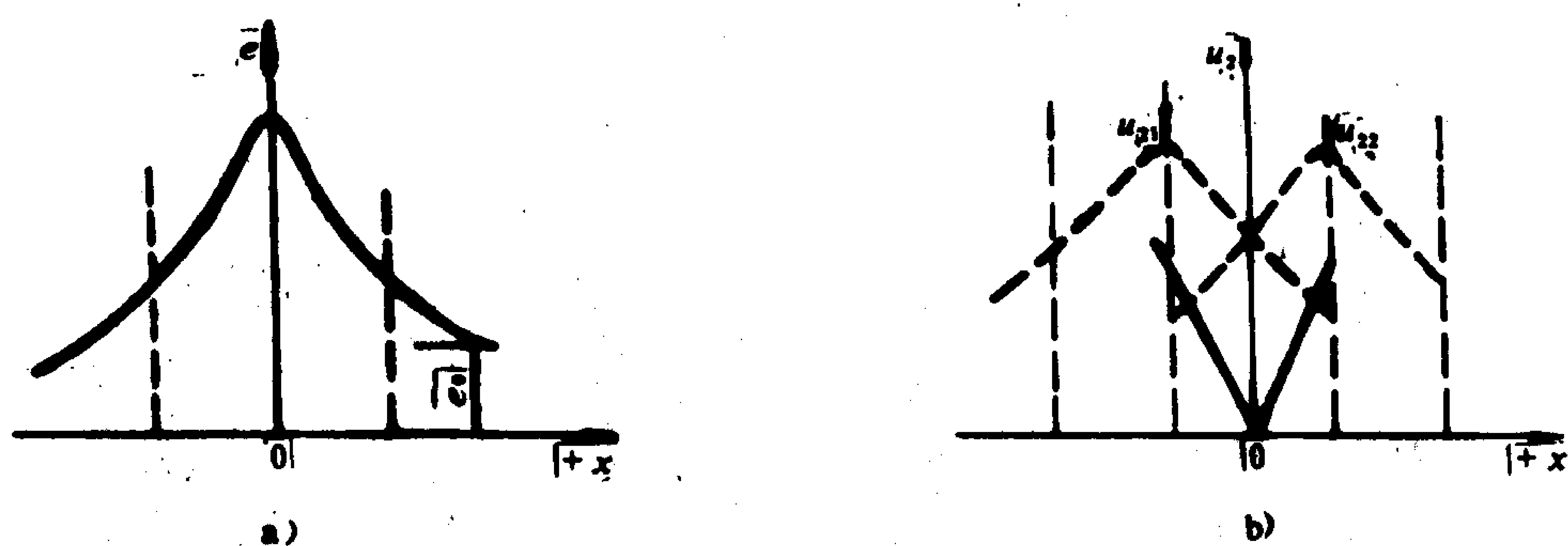


图 1.2.1-30 差动变压器特性
a)次级线圈输出特性；b)差动变压器输出特性

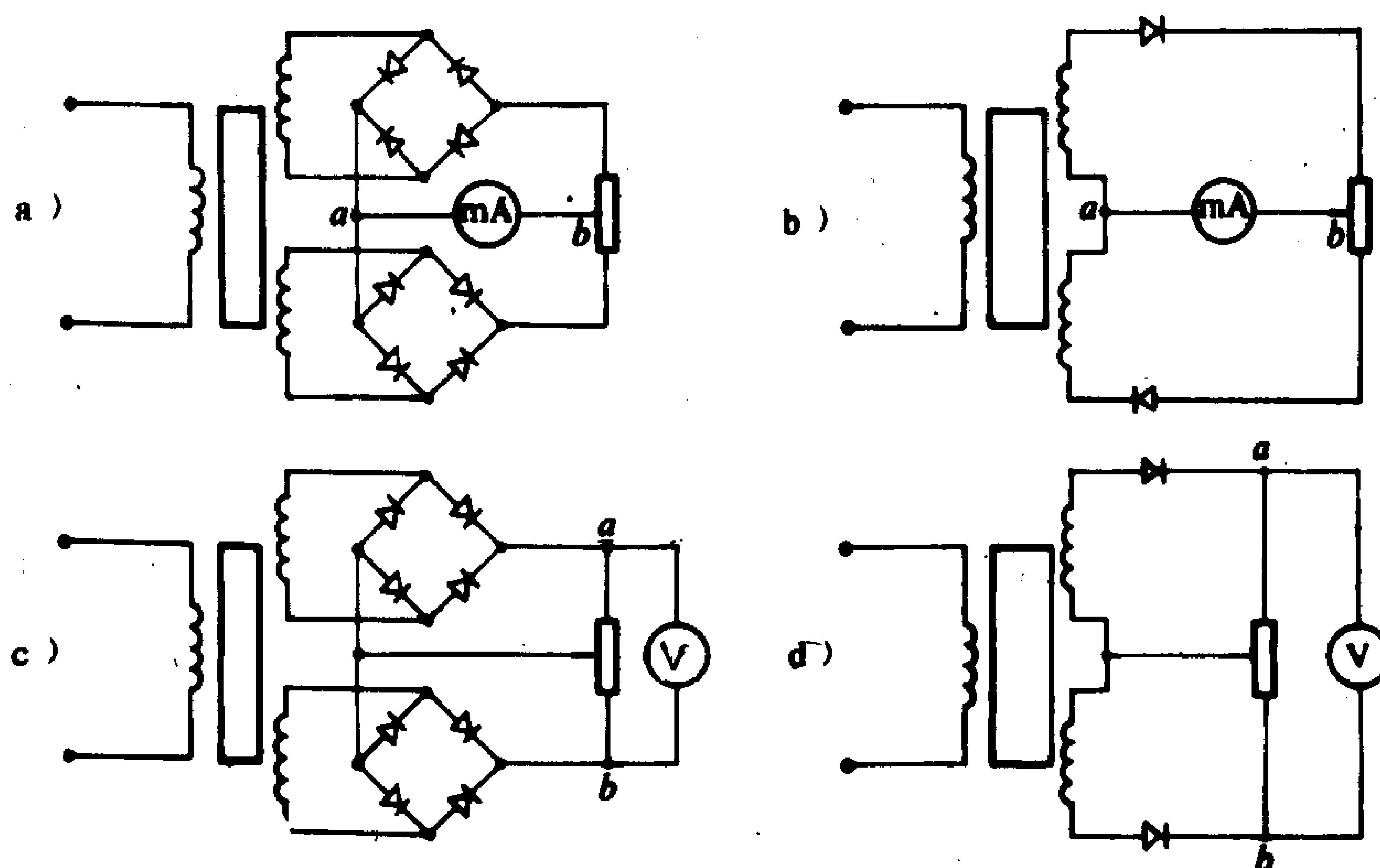


图 1.2.1-31 差动整流电路
a)全波电流输出； b)半波电流输出；
c)全波电压输出； d)半波电压输出

在连结高阻抗负载的场合，是电压输出型，图a）和b）电路的线性基本上与负载大小无关。

差动整流后的输出电压的线性与不经整流的次级输出电压的线性有所不同，当次级线圈阻抗高，负载电阻大，接入电容器进行滤波时，其输出线性的变化倾向是：当铁芯位移大时，输出灵敏度增加，利用这一特性就能够使差动变压器的直线范围扩展。

2.4 磁电式变换器

2.4.1 工作原理

把被测参数变换为感应电动势的变换器，称为"磁电变换器"（或称感应式变换器）。根据电磁感应定律，具有 W 匝线圈里的感应电势 e的大小取决于贯穿这线圈的磁通 ϕ 的变化速率，即

$$e=-W\frac{d\phi}{dt} \tag{1.2.1-61}$$

式中：一号表示感应电势 e 的方向，即由它所产生的电流总是力图阻止磁通 ϕ 的改变。

图 1.2.1-32 a） 和b)，是这种变换器的结构原理图。图 1.2.1-32 a） 所示的结构是线圈作直线运动的磁电变换器。当线圈在磁场中作直线运动时，它所产生的感应电势 e为

$$e=WBl\frac{dx}{dt}\sin\theta=WBlV\sin\theta \tag{1.2.1-62}$$

式中：B——磁场的磁感应强度；

l——单匝线圈的有效长度；

W——线圈匝数；

V——线圈与磁场的相对运动速度；

θ——线圈运动方向与磁场方向的夹角。

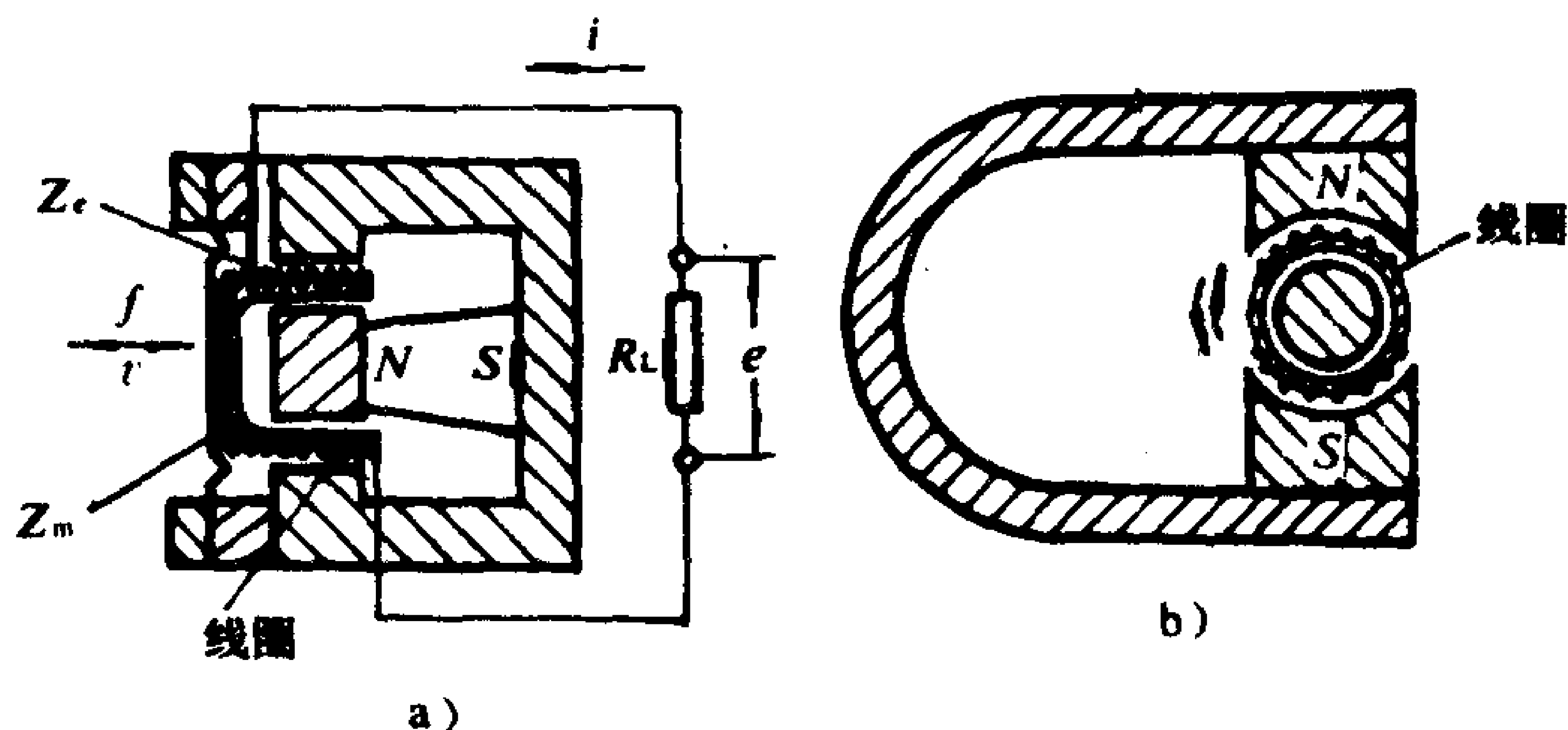


图 1.2.1-32　恒定磁通磁电式变换器

当 $\theta=90^\circ$ 时，式(1.2.1-86）可写成

$$e=WBlV \tag{1.2.1-63}$$

图 1.2.1-32 b）所示的结构是线圈作旋转运动的磁电式变换器。线圈在磁场中转动时产生的感应电势 e为

$$e=WBA\frac{d\theta}{dt}\sin\theta=WBA\omega\sin\theta \tag{1.2.1-64}$$

式中：ω——角频率，$\omega=\dfrac{d\theta}{dt}$；

A——单匝线圈的截面积；

θ——线圈法线方向与磁场之间的夹角。

当 $\theta=90^\circ$ 时，式（1.2.1-64）可写成

$$e=WBA\omega \tag{1.2.1-65}$$

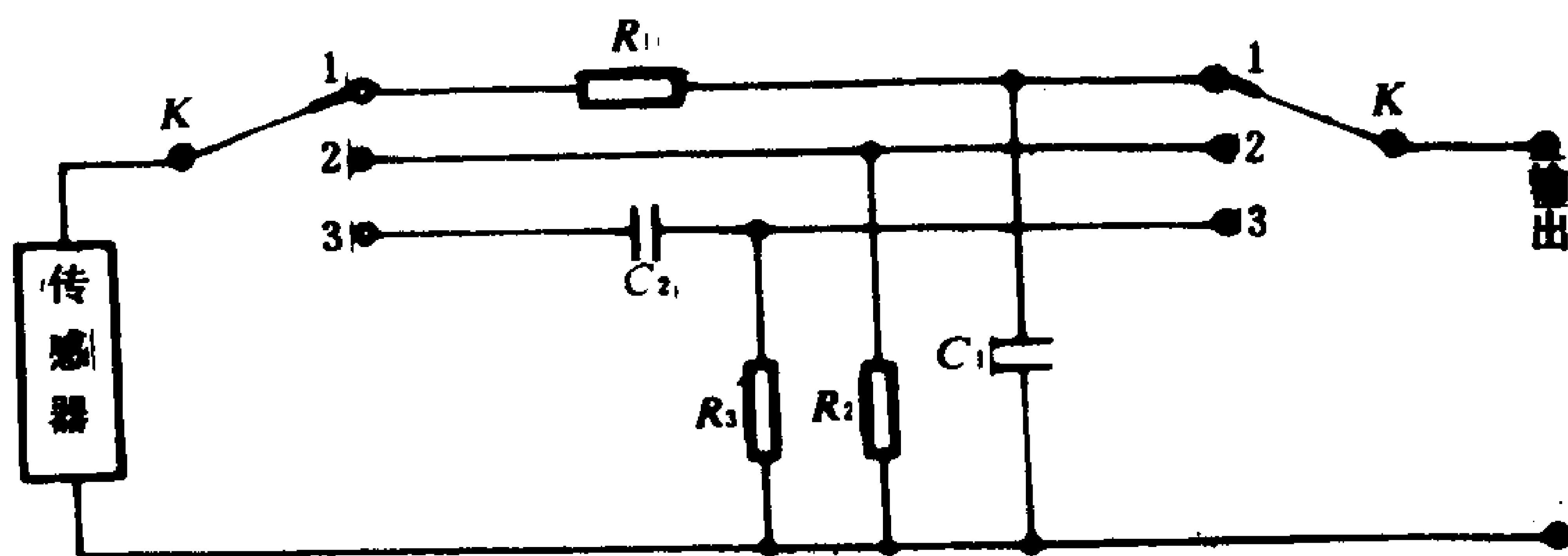


图 1.2.1-33 运算电路图

由式（1.2.1-63）和式（1.2.1-65）可以看出，当变换器结构一定时，B、A、W、l 均为常数，因此，感应电势e 与线圈对磁场的相对运动速度 $\frac{dx}{dt}$（或$\frac{d\theta}{dt}$）成正比，所以这种变换器的基型是一种速度变换器，但是由于速度与位移或加速度有内在联系，仅差一个积分或微分关系，因此，如果在感应电势的测量电路中接一积分电路，那么，其输出电压就与位移成正比关系，如果在测量电路中接一微分电路，那么，输出电压就与运动的加速度成正比，这样磁电变换器除可测量速度外，还可以用来测量位移和加速度。

2.4.2 测量电路

根据磁电变换器的工作原理，可知它的输出电势大小与运动速度成正比。这是一只测速的变换器，但是在实际测量中，它常常被用来作为测量运动的位移（或振幅）和加速度，因此为了能使信号大小与位移和加速度成正比，必须将信号加以变换，一般是在测量电路中接入一积分电路和微分电路，用开关切换，如图 1.2.1-33 所示。

当开关 K 放在“1”位置时，经过一个积分电路，可测量位移的大小。当开关 K 在“2”位置时，不经过运算电路直接输出，可用来测量速度。当开关放在“3”位置时，信号通过微分电路，可以测量加速度。

2.5 压电式变换器

2.5.1 工作原理

压电变换器工作原理是以某些物质的压电效应为基础的。

有些结晶物质沿它的某个结晶轴受到力的作用时，其内部有极化现象，在它的表面上有电荷集结，其大小和作用力的大小成正比，这种效应称为“正压电效应。”反之，如果在晶体的某些表面之间加上电场，在晶体内部也产生极化现象，同时晶体产生变形，这种现象称为“逆压电效应”。具有压电效应的晶体称为压电晶体，作为压电变换器材料的压电晶体有：石英晶体，钛酸钡，锆钛酸铅等。

压电材料的性质，以石英为例说明，如图 1.2.1-34 所示。表示天然结构的石英晶体，它是一个正六面体，在晶体学中可以把它用三根互相垂直的轴来表示，其中纵向轴 $Z—Z$ 称为光轴，经过正六面体棱线并垂直于光轴 $X—X$轴称为电轴，与 $X—X$轴和 $Z—Z$轴同时垂直的$Y—Y$轴称为机械轴。

从晶体上沿 $Y—Y$轴方向切下的薄片称为晶体切片图 1.2.1-34 b)，在每一切片中，当沿电轴方向作用有力 F_x 时，则在与电轴垂直的平面上产生电荷 q_x。

如果在同一切片上作用的力是沿着机械轴的方向，其电荷仍在与 x 轴垂直的平面上出现，而极性方向相反，此时产生电荷 q_y。沿 y 轴的压力所引起的电荷极性与沿x 轴的压力所引起的电荷极性是相反的。

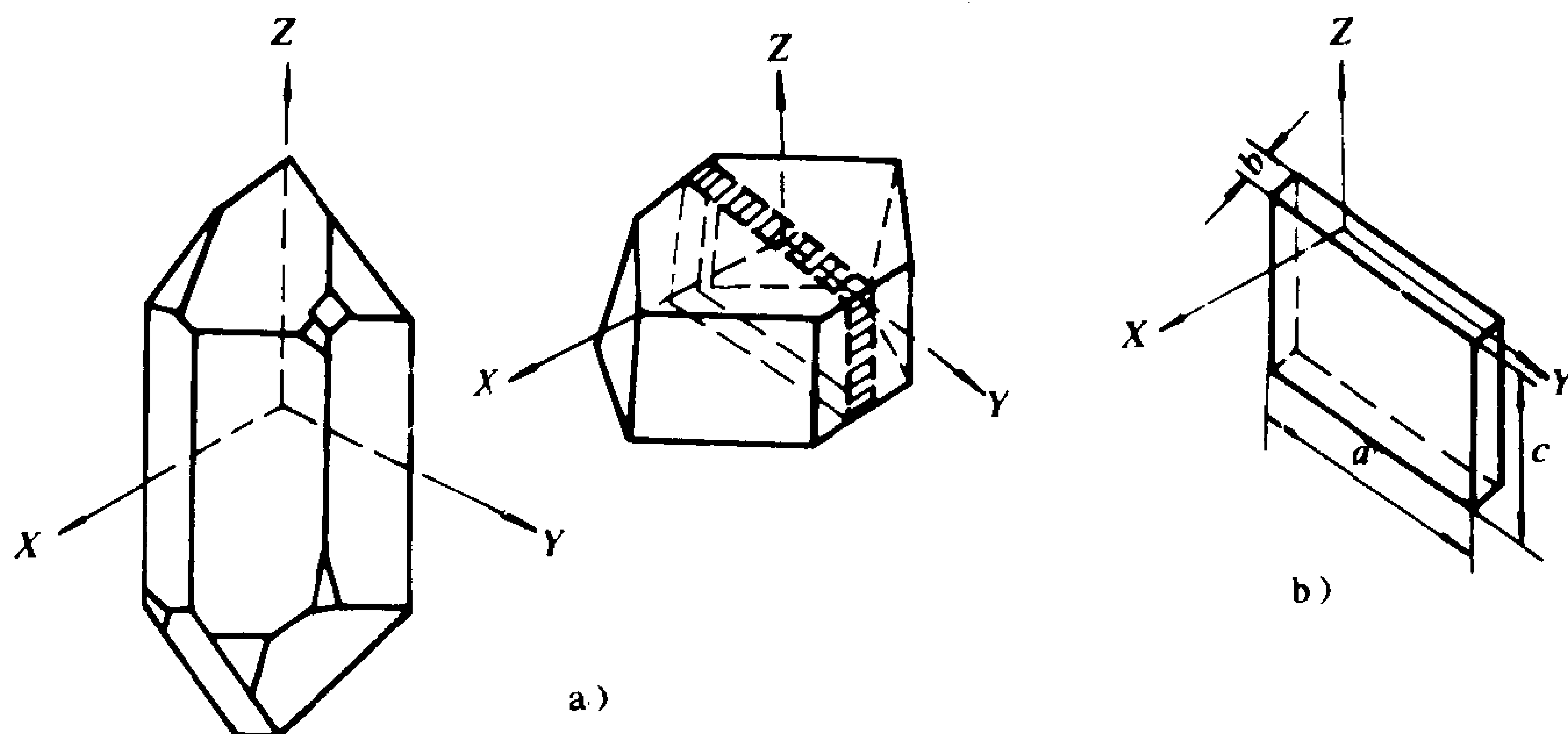


图 1.2.1-34 石英晶体
a)天然晶体；b)晶体切片

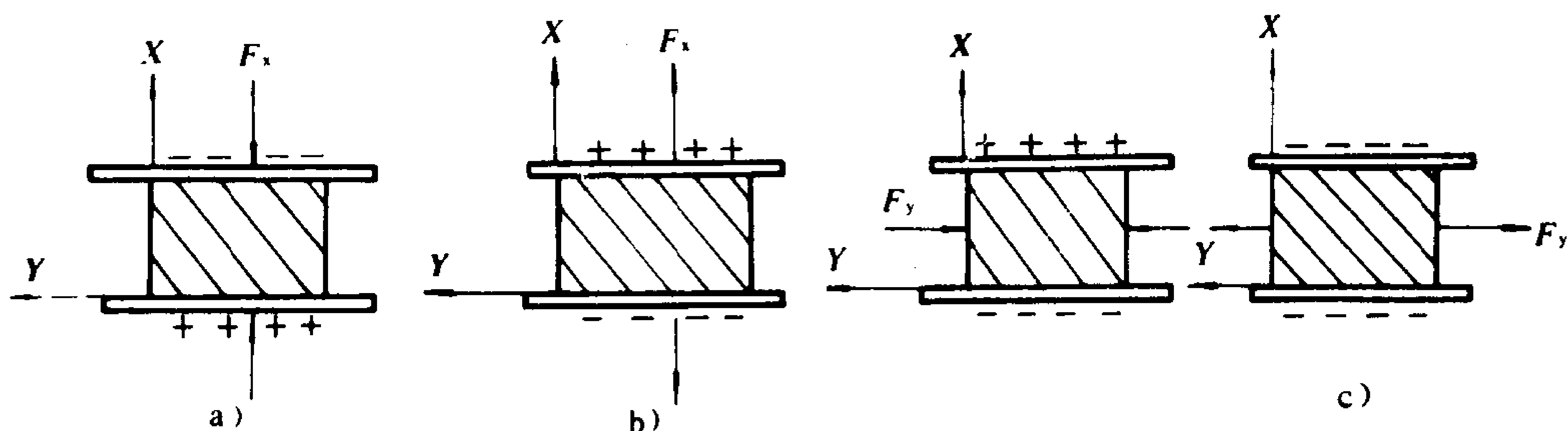


图 1.2.1-35 晶体切片上电荷符号与受力方向的关系
a)x轴方向受压力； b)x轴方向受拉力；
c)y轴方向受压力； d)y轴方向受拉力

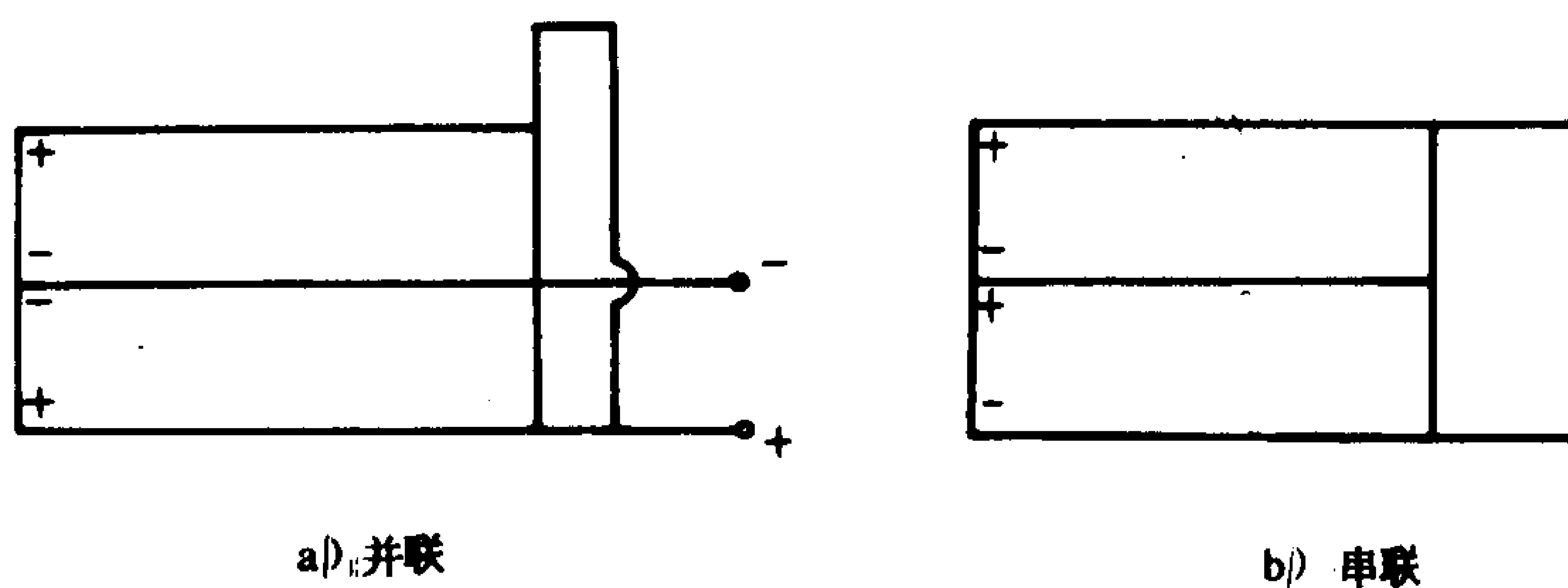


图 1.2.1-36

综上所述，晶体切片上电荷的符号与受力方向的关系可用图 1.2.1-35 表示。

2.5.2 压电效应的输出

压电变换器就是利用压电材料的压电效应制成的变换器，即当有一力作用在压电材料上时，变换器就有电荷输出，因此从它可测的基本参数来讲是一只力变换器，但是通过改变变换器结构和测量线路之后，也可以

测量加速度，速度等振动和力的参数。

对于压电变换器的基本要求是：高的自振频率，高的绝缘性，高的灵敏度，温度变化的稳定性。为满足以上要求，在结构上采取一些相应的措施。

在压电变换器中，压电材料一般不用一片，而常常采用两片以上粘结在一起，这样可以提高灵敏度。由于压电材料是有极性的，因此接法上有两种。如图 1.2.1-36 所示，在图 1.2.1-36 a）中两片压电材料的负电荷都集中在中间电极上这种接法叫并联，其输出电容 C' 为单片电容 C 的两倍，但输出电压 V' 等于单片的电压 V，电极上的电荷量 Q'为单片电荷量 Q的两倍。即

$$Q'=2Q \quad V'=V \qquad C'=2C$$

在图 1.2.1-36 b）中的接法，正电荷集中在上极板，负电荷集中在下极板，在中间的极板由于上片产生的负电荷与下片产生的正电荷相互抵销，这种接法为两压电片的串联。从图中可知输出的总电荷 Q'，等于单片电荷 Q，而输出电压 V' 为单片电压 V 的两倍，总电容 C'为单片电容 C 的一半，即

$$Q'=Q \qquad V'=2V \qquad C'=\frac{C}{2}$$

在这两种接法中，并联接法输出电荷大，本身电容大，时间常数大，适用于测量以电荷做为输出量的地方，而串联接法输出电压大，本身电容小，适用于以电压做输出信号，并且测量电路输入阻抗很高的地方。

2.5.3 测量电路

1）等效电路

当压电变换器的压电元件，受到外力作用时，就会在垂直于极化方向表面上出现电荷，在一个极板上聚集正电荷，另一个极板上聚集负电荷，这两个电荷量相等，压电变换器可以看作是一个电荷发生器，同时，也是一个电容器，如图 1.2.1-37 所示，其电容量为

$$C=\frac{\varepsilon A}{n} \tag{1.2.1-66}$$

式中：A——极板面积；

n——压电片厚度；

ε——压电材料的介电常数。

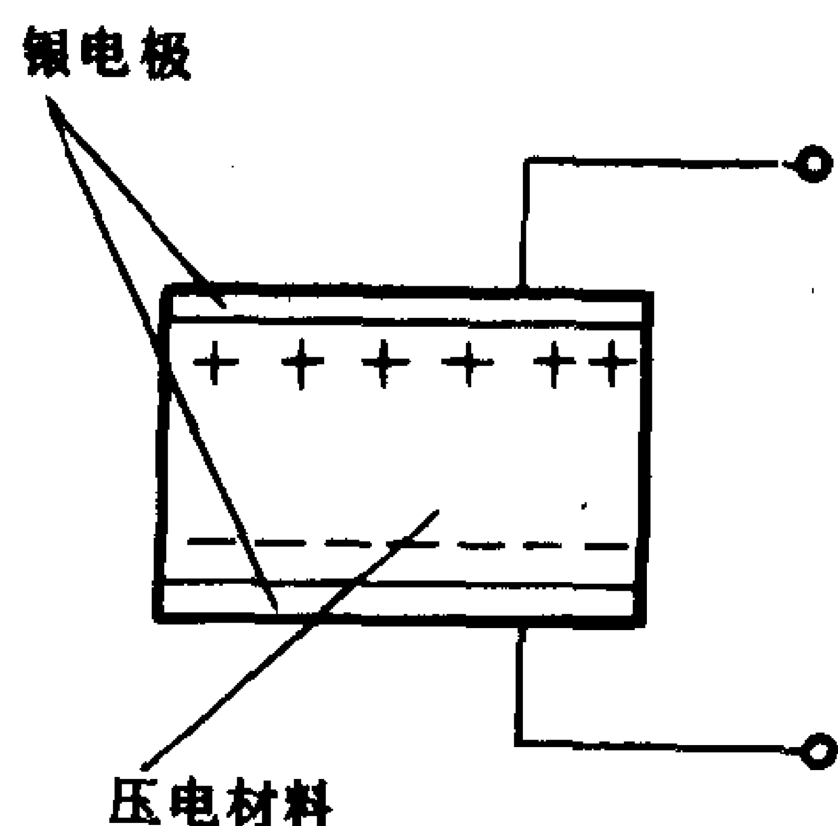


图 1.2.1-37　电容器

因此可以把压电变换器等效成一个与电容相关联的电荷源，如图 1.2.1-38 所示，电容器上的电压 V_a、电荷量 q与电容 C_a 三者关系为

$$V_a=\frac{q}{C_a} \tag{1.2.1-67}$$

式中：C_a——压电元件内部电容。

由图中可见，只有在外电路，负载无穷大，内部也无漏电时，受力所产生的电压 V 才能长期保存下来。如果负载不是无穷大，则电路就要以时间常数 $R_{f_2}C'$ 按指数规律放电，当用来测量一个变化频率很低的参数时，就必须保证负载 R_{f_2} 具有很大的数值，以保证有很大的时间常数 $R_{f_2}C$，使漏电造成的电压降很小，不致造成显著误差，这时 R_{f_2} 常要达到数百兆欧以上。

如果把压电传感器与测量仪表连在一起，应考虑到连在一起时，连接电缆的等效电容，放大器的输入电阻，输入电容，完整的等效电路如图 1.2.1-39，两种实质是一样的，只是表示的方式不同而已。

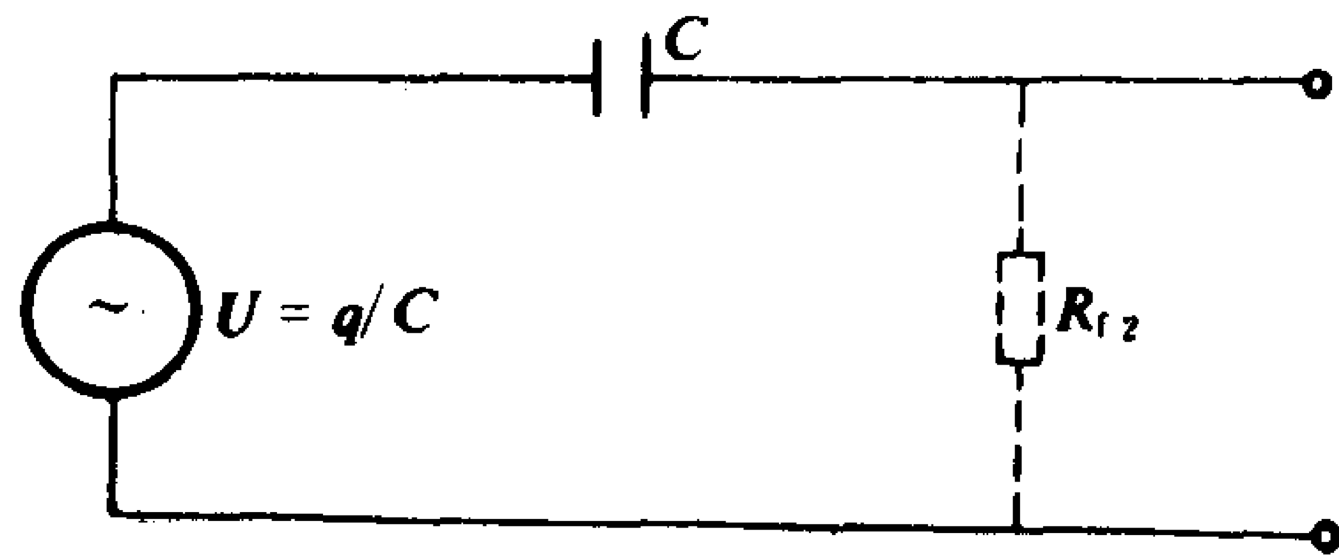
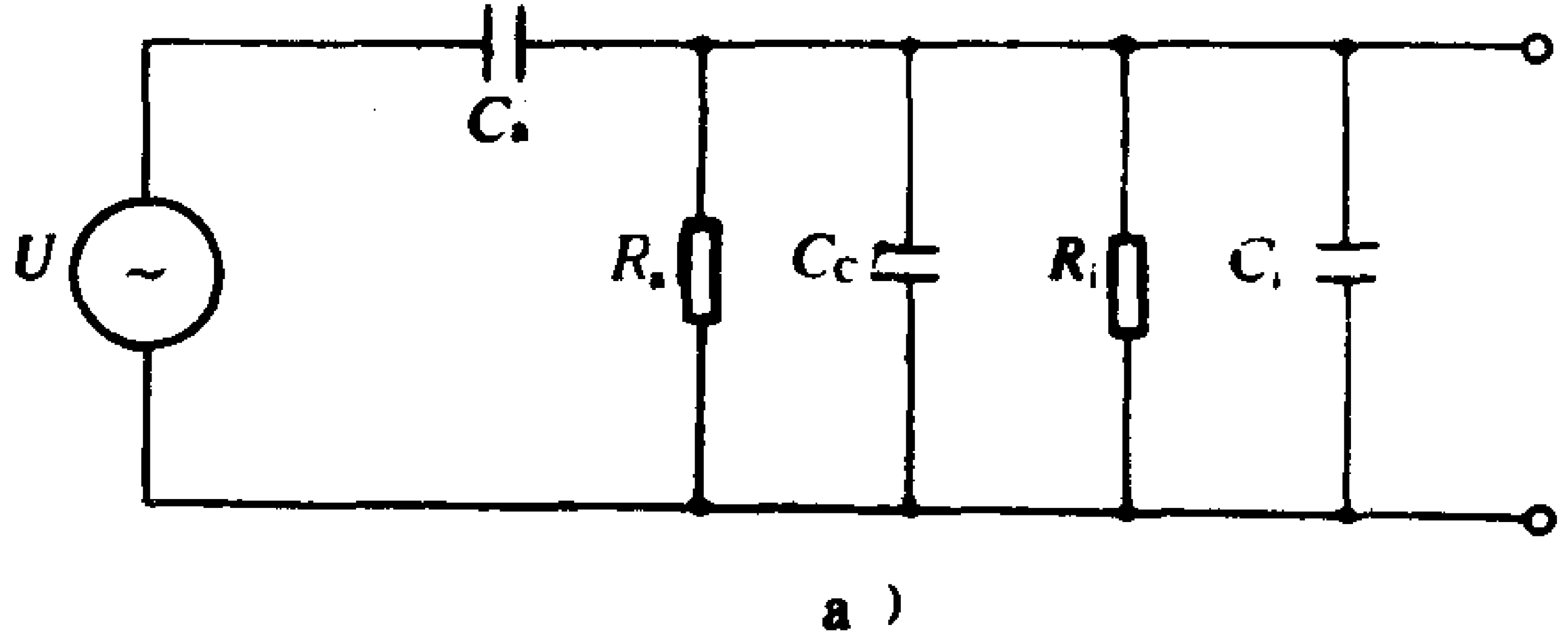


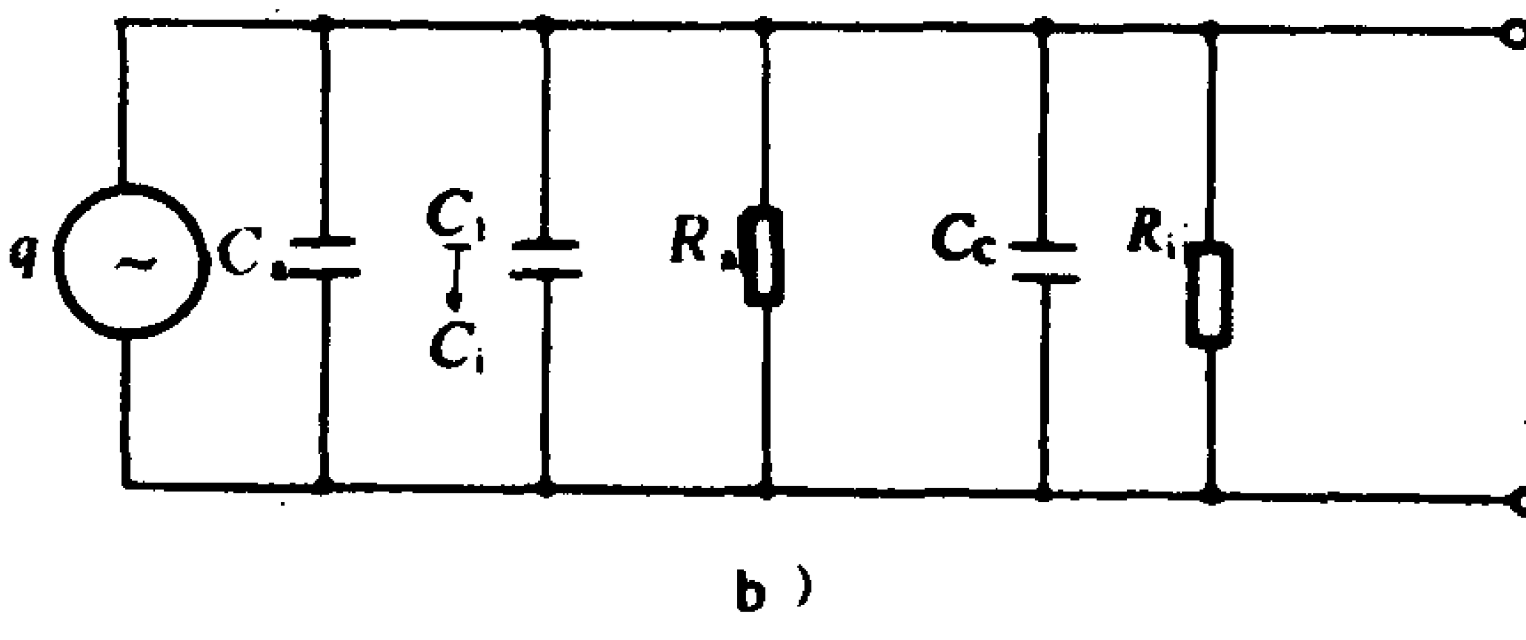
图 1.2.1-38 压电传感器的等效电路

综上可知，为了减少测量误差，要求压电变换器的测量电路必须是高输入阻抗的放大器，通常是在放大器与变换器之间加入高阻抗的前置放大器，然后再采用一般的放大，检波指示或通过功率放大接至记录器。

根据压电变换器的工作原理及等效电路，它的输出可以是电压信号，也可以是电荷信号，因此，设计前置放大器也有两种形式，一种是电压放大器，一种是电荷放大器。



a）



b）

图 1.2.1-39 等效电路

a)以电压灵敏度表示时；b)以电荷灵敏度表示时

C_a-传感器的电容； R_a-传感器漏电阻；

C_c-连接电缆的等效电容；

C_iR_i-放大器的输入电容和电阻

2）电压放大器

图 1.2.1-40 a）为由压电变换器、电缆和放大器输入端组成的等效电路，图a）可以简化为图b）的等效电路。

图b）中等效电容 $C=C_T+C_c+C_i$

等效电阻 $R=R_T\|R_i=\dfrac{R_T\cdot R_i}{R_T+R_i}$

式中：C_i、C_T——变换器的电容和绝缘电阻；

C_c——电缆电容；

C_i、R_i——放大器的输入电容和输入电阻。

压电晶体片上产生的总电荷量 Q为

$$Q= K\ F \tag{1.2.1-68}$$

由于所产生的总电荷量的一部分使电容 C 充电而获得电压 V_i，即 $V_i=Q_1/C$，另一部分经电阻 R 漏损掉，并在电阻 R 上产生电压降，其大小也应该是 V_i，即 $V_i=\dfrac{dQ_2}{dt}R$。因此可写成

$$Q=Q_1+Q_2=K\cdot F \tag{1.2.1-69}$$

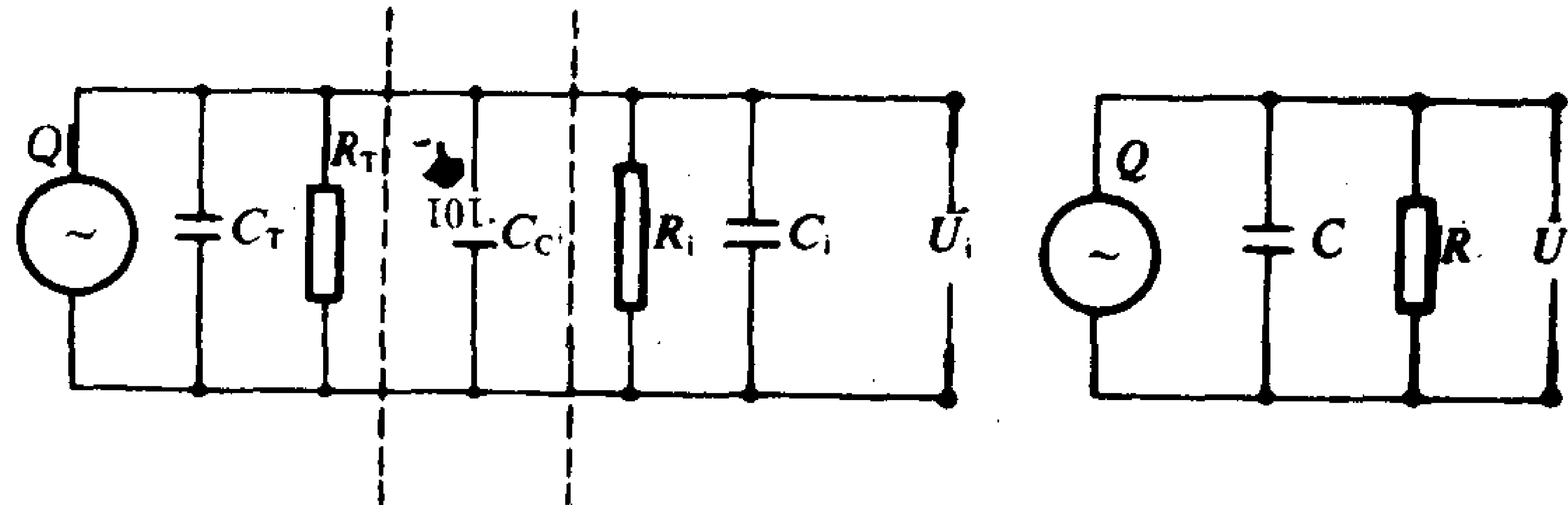


图 1.2.1-40 压电变换器、电缆、电压放大器输入端组成的等效电路

当压电变换器受到一个按正弦规律变化的力 $F=$

$F_0 \cdot \sin Wt$作用时，则产生的电荷量为 $Q = Q_0 \sin Wt$，

因此，前置放大器输入电压的幅值为

$$V_m = \frac{Q_0 WR}{\sqrt{1+(WRC)^2}} = \frac{KF \cdot WR}{\sqrt{1+(WRC)^2}} \quad (1.2.1\text{-}70)$$

从（1.2.1-70）式可知

（1）当 $W=0$ 时，由上式求出放大器输入电压 $V_m=0$，这说明电压放大器与压电变换器相配是不适于测量静态参数的。

（2）当 $WC \ll \frac{1}{R}$ 时，即在测量低频动态参数时，由式（1.2.1-70）得到的是 $U_m = K \cdot FWR$ 在这种状态下电压放大器的输入电压与力 F，频率 W 成正比关系，但是随频率的下降，电压放大器的输入电压也跟着下降。

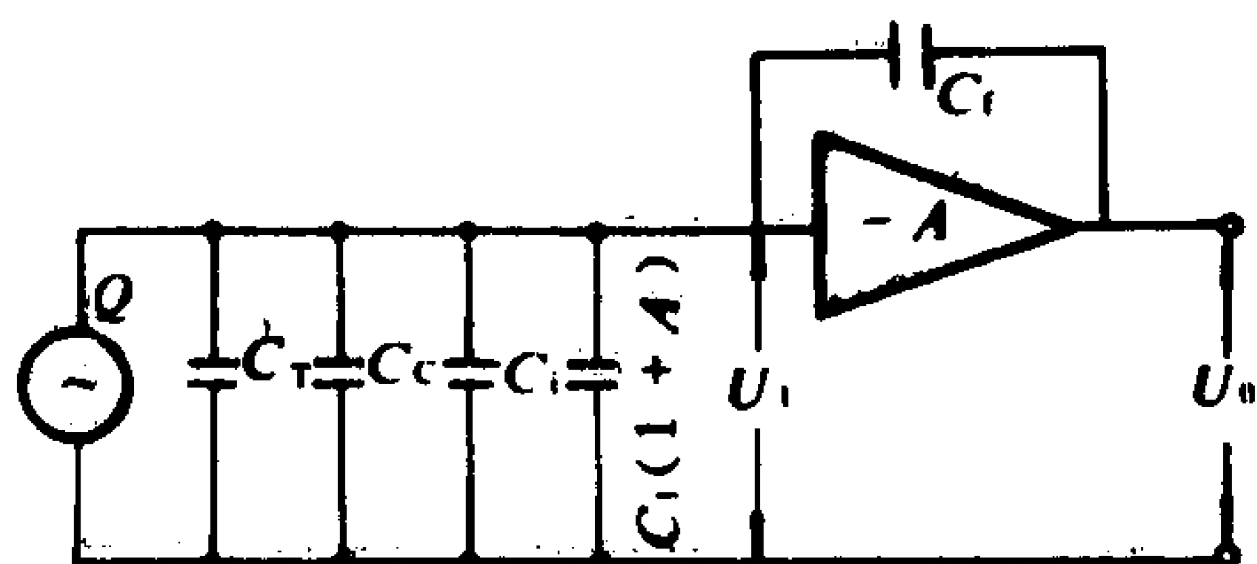


图 1.2.1-41　电荷放大器的等效电路图

（3）当 $WC \gg \frac{1}{R}$ 时，即在测量高频参数时，由式（1.2.1-70）求出的输入电压 $V_m = KF/C$，这说明对于高频参数，电压放大器的输入电压不再随输入参数的频率而变，也就是说只有在频率 W 愈高的条件下，愈能满足 $WC \gg \frac{1}{R}$ 的条件，使得电压放大器的输入电压只随作用力的大小而变化。由此可见，为了正确地反映测量值，必须要有足够大的时间常数 RC。加大 RC 的数值，就是使放电过程变慢，以展宽低频段的工作范围。不过，增大电容量 C 的方法是不利的，因为总电容的增加，势必造成变换器电压灵敏度的下降。所以，只有尽量增大等效电阻 R，一般 R 应在 10^{12} Ω以上。

据此当放大器工作在高频段，即 $WC \gg \frac{1}{R}$ 时，由于 $V_m = KF/G_T + C_c + C_i$ 所以导线的长度会增大电缆分布电容 C_c，使输入信号电压下降，明显地降低电压灵敏度，同时产生频率和相位失真，以及提高了输入动态的低频下限范围。因此，采用电压前置放大器来处理压电式变换器的输出信号时，规定电缆长度为 1.2 到 1.5 m，更换电缆式改变电缆长度时必须修正灵敏度，这给使用带来不方便。

3) 电荷放大器

压电式变换器其输出信号是数量很小的电荷，采用电压放大器同压电变换器配合时，其缺点是，电缆导线不宜过长，测量频率响应的下限不易做得很低，因而往往采用电荷放大器与压电变换器相配合。电荷放大器的优点是，对传输电缆电容不敏感，传输距离可达数百米；并且低频响应好，可测到 0.003 Hz。因而适于低频或超低频测量。电荷放大器的缺点是内部噪音较大，成本高。

在采用电荷放大器的情况下，压电变换器视为一个电荷源。电荷放大器是一个高增益的，具有反馈电容 C_f 的运算放大器，当略去电阻 R 时，其等效电路。如图 1.2.1-41 所示。

图中 A 为运算放大器，其开环增益为 A，C_f为反馈电容。

由图可知，此放大器是一个电压并联负反馈电路，从放大器输入端看，相当于有$Z_f/1+A$的反馈输入阻抗和输入端阻抗并联。反馈电容 C_f 在输入端的作用增加 $(1+A)$ 倍，这就增加了输入回路的时间常数。当压电变换器受外力作用产生电荷 Q 时，将向所有电容充电，此时放大器输入端的电压 V_i 为：

$$V_i=Q/[C_T+C_c+C_i+(1+A)C_f] \tag{1.2.1-71}$$

电荷放大器的输出电压为

$$V_0=-A\,V_i=-\frac{AQ}{C_T+C_c+C_i+(1+A)C_f} \tag{1.2.1-72}$$

因为 A 值很大（达 10^4以上），所以 $A\gg1$,则上式可简化为

$$V_0\approx-Q/C_f \tag{1.2.1-73}$$

式中，－ 号表示本级的输出与输入反相，其量纲分别是 Q 为微微库仑，C_f 为微微法，电压为伏。。

式 $V_0=-\frac{Q}{C_f}$ 说明电荷放大器的输出电压和电荷量及反馈电容量有关，对于电缆的分布电容 C_c 的影响可忽略不计，即电缆的分布电容对测量的灵敏度无明显影响，但是 C_f 值选得过大也会影响灵敏度下降，同时放大器的线性度好。

对上述两种前置放大器，一般说来电压放大器的结构比较简单，所需元件比电荷放大器少，因此，价格便宜可靠性强。而另一方面，电荷放大器可不考虑导线长度和低频响应，这是选择前置放大器时的一般依据。

2.6 热电式变换器

2.6.1 热电现象和热电偶的基本定律

热电变换器（常称热电偶）是利用不同导体间的“热电效应”现象制成的，即将两种不同的导体，组成一个闭合回路。如图 1.2.1-42 所示。如果两端结点的温度不同，则在两结点间产生一电动势，而在回路中有一定大小的电流。这个电动势或电流与两种导体的性质和结点温度有关，这种物理现象称为热电效应。

如在热电偶中插入第三种，第四种……金属（在实际应用热电偶时，这是不可避免的，因为热电偶要焊接，同时要接入测量仪表），只要插入金属的两端温度相同(不管此金属本身

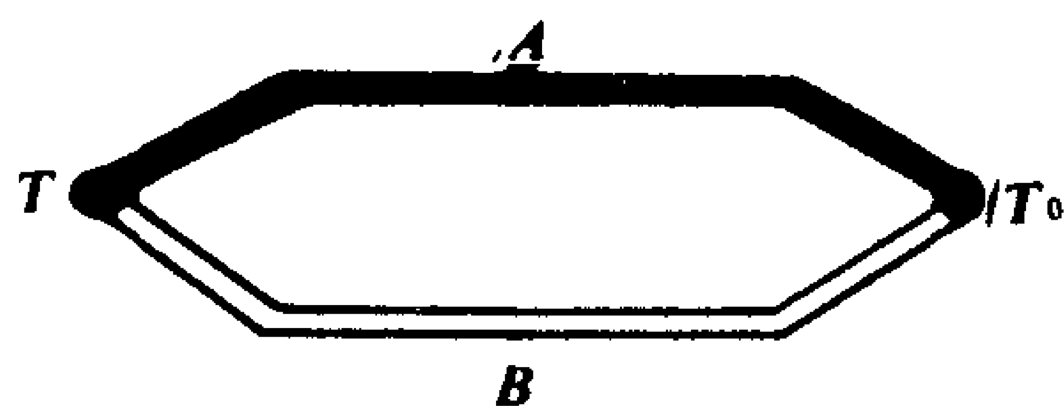


图 1.2.1-42 热电效应

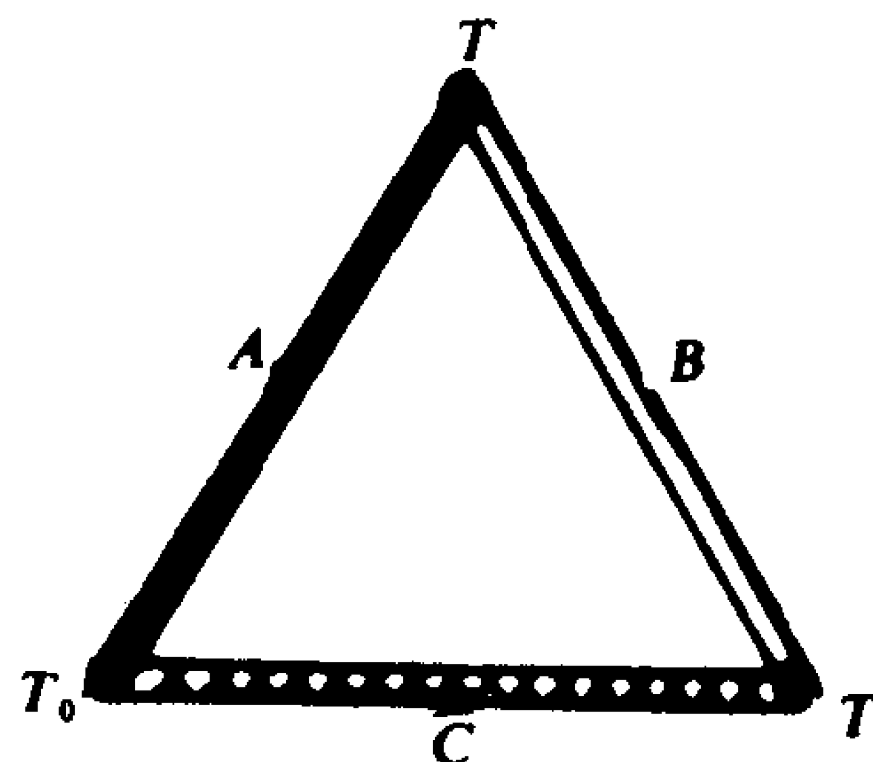


图 1.2.1-43 三种导体的热电回路

的某一段是否存在温度梯度，也不管此第三种金属是接在金属 A 和 B 之间，如图 1.2.1-43 所示。还是接在某一种金属中间，不会有附加的热电势发生，亦即插入第三种金属不会使热电偶的热电势发生变化。

2.6.2 常用热电偶及其性质

根据工业标准化的需要来分，可以分为标准化热电偶和非标准化热电偶。标准化热电偶是指那些工艺上比较成熟，应用广泛，已大批量生产并经国家定型的热电偶。表 1.2.1-3 列出了我国的标准化热电偶及其技术参数，同一型号的标准化热电偶，具有良好的互换性，并有与它配套的显示、纪录仪表。非标准化热电偶产量少、应用面小，多用于某些特殊用途。

根据测温范围热电偶也可分为高温热电偶（如钨铼$_5$——钨铼$_{20}$、铂铑$_{30}$—铂铑$_6$等）中温

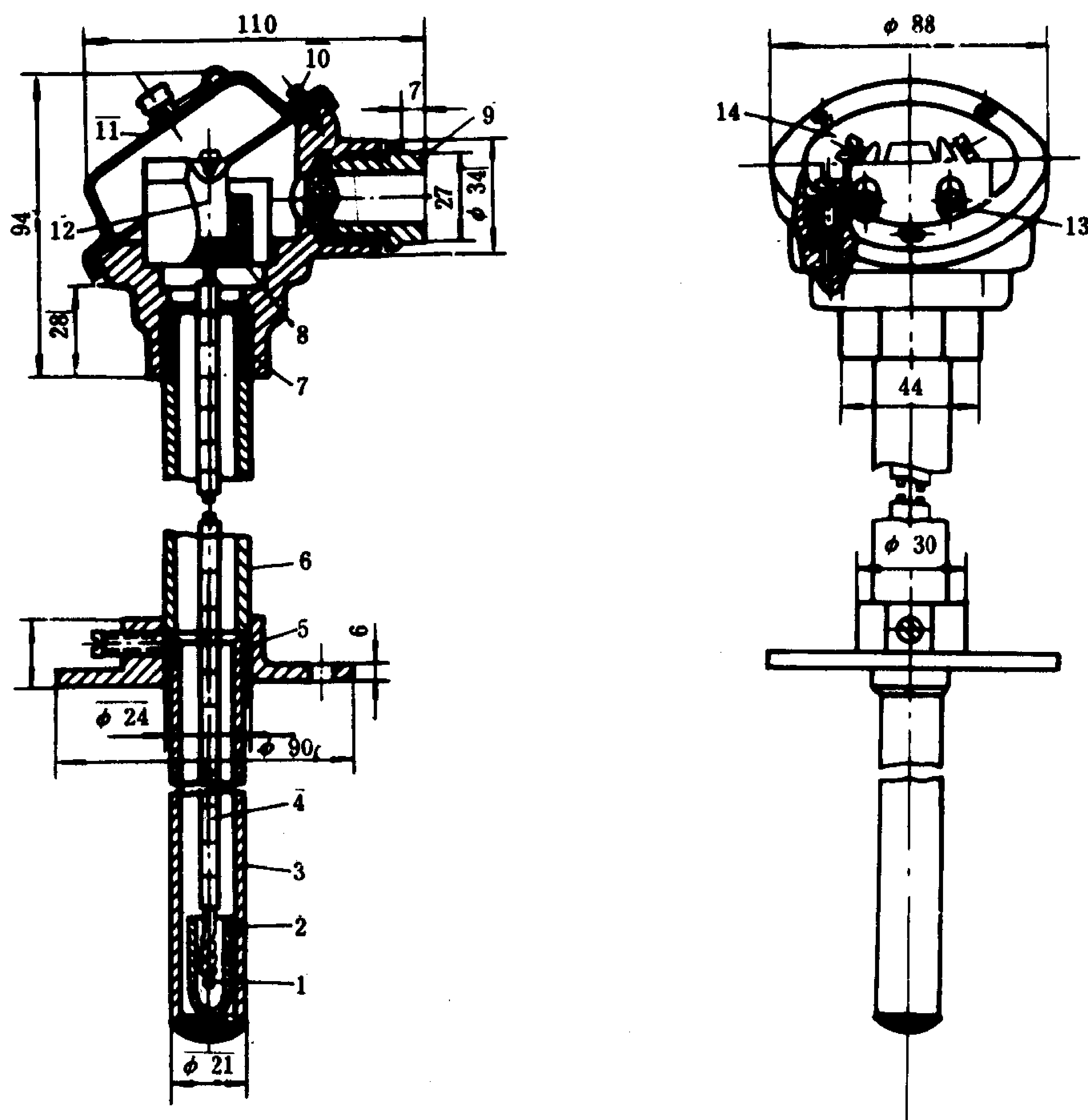


图 1.2.1-44 普通热电偶的结构

1-热电偶热端；2-绝缘套；3-下保护套管；4-绝缘珠管；5-固定法兰 6-上保护套管；7-接线盒底座；8-接线绝缘座；9-引出线套管；10-固定螺钉；11-外罩；12-接线柱；13-引出电极固定螺钉；14-引出线固定螺钉

表 1.2.1-3 我国的标准热电偶及其技术参数

热电偶名称	热电极特性											测量范围		100℃	允许误差			
	极性	识别	化学成分	密度 g/cm³	熔点 ℃	膨胀系数 1～100℃ 1/℃	比热 J/kg·K	导热系数 W/mm·K	电阻温度系数 0～100℃ 1/℃	电阻率 $\times10^{-4}\Omega\cdot m$	与铂丝配偶 100℃时的热电势mV	长期 ℃	短期 ℃	时的热电势 mV	温度 ℃	允差 ℃	温度 ℃	允差 ℃
铂铑—铂	正	较硬	Pt 90% +Rh 10%	20.00	1853	9.0×10^{-6}	146.54	37.6	1.67×10^{-3}	0.190	+0.064	1300	1600	0.643	≤600	±2.4	≥600	±0.4
	负	柔软	Pt 100%	21.32	1772	8.99×10^{-6}	133.98	68.44～71.31	$(3.92-3.98)\times10^{-3}$	0.098 −0.106	0.00							
铂铑—铂铑	正	较硬	Pt 70% +Rh 30%									1600	1800	0.034	≤600	±3	>600	±0.5
	负	稍软	Pt 94% +Rh 6%															
镍铬—镍硅（镍铬—镍铝）	正	不亲磁	Cr 9～10% Si 0.4% Ni 90%	8.2	1500	1.7×10^{-6}			1.4×10^{-4}	0.95～1.05	+1.5～+2.5	1000	1200	4.1	≤400	±4	>400	±0.75
	负	稍亲磁	Si 2.5～3.0% Co 0.6% Ni 97%															
镍铬—考铜	正	色较暗	Cr 9～10% Si 0.4% Ni 90%	8.2	1500	1.7×10^{-5}			1.4×10^{-4}	0.95～1.05	+1.5～+2.5	−200～600	800	6.95	≤400	±4	>400	±1
	负	银白色	Cu 56～57% Ni 43～44%	9.0	1250	1.56×10^{-5}			1.0×10^{-4}	0.49	−4.0							
铜—康铜	正	红色	Cu 100%	8.95	1084.5	1.65×10^{-5}	391.84	394.4	4.33×10^{-3}	0.0156～0.0168	+0.76	−200～200	300	4.26	−200～400	±2	−40～400	±0.75
	负	银白色	Cu 55% Ni 45%	8.9	1222	1.19×10^{-5}	393.56	20.9	1×10^{-6}	0.49	−0.35							

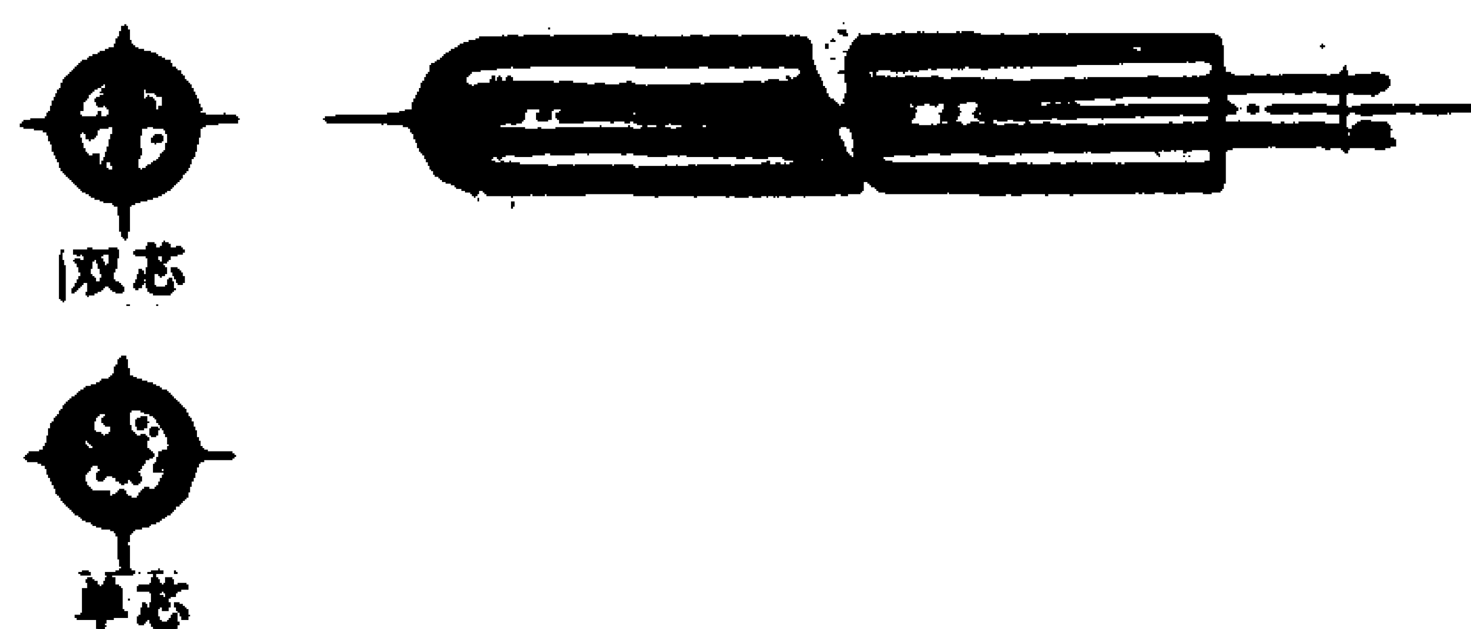


图 1.2.1-45 铠装热电偶

热电偶(如镍铬—镍硅、镍铬—考铜等)低温热电偶(如铜—康铜、镍铬—铁金$_{0.03}$等)。

热电偶的结构形式，根据其用途不同，可以分为如下几类型:

1)普通热电偶

普通热电偶主要用于测量气体、蒸气、液体等介质的温度，由于使用的条件基本相似，所以这类热电偶已做成标准型式。其中包括有棒形、角形、锥形等，并且做成无专门固定装置，有螺纹固定装置及法兰固定装置等各种形式。如图 1.2.1-44 所示，为一棒式、无螺纹、法兰固定的普通热电偶的结构。热电极的外边分别套以绝缘珠管 4，最外面为保护套管 3。在上端为一接线盒，连接导线在接线柱 12 与热电极连接，并由引出线套管 9 伸出接至显示仪表。

2)铠装热电偶

铠装热电偶是目前应用较广泛的一种，它是由热电极、绝缘材料和金属保护套管三者组合成一体的特殊结构的热电偶，它可以做得很细、很长，而且可以弯曲，所以又称缆式热电偶，其结构如图 1.2.1-45 所示，它分为单芯和双芯两种。

铠装热电偶外径可以小到 1 ~ 3 mm，内部热电极直径常为 0.2~0.8 mm，而套管外壁一般为 0.12~0.60 mm。

铠装热电偶的特点是热惯性小，有良好的柔性，便于弯曲，抗振性能好，动态响应快(时间常数可达 0.01 s)，适用于测量位置狭小的对象上各种的温度。

2.6.3 热电偶冷端温度补偿

根据热电偶测温原理，热电偶所产生的热电势 $E(t, t_0)$ 为两端温度 t 和 t_0 的函数。为了便于使用，通常总是使热电势成为温度 t 的单值函数，这就需要冷端温度 t_0 为 0℃ 或为某一定值，使热电势只随被测温度 t 变化。即:

$$E_{AB}(t,0)=f(t) \tag{1.2.1-74}$$

或 $$E_{AB}(t,t_0)=f(t)-C \tag{1.2.1-75}$$

但由于冷端温度 t_0 受周围环境温度的影响，而难以自行保持为 0℃ 或某一定值。因此，为减小测量误差，须将热电偶冷端人为地采取一定措施，使其温度为恒定。或用其他方法进行校正和补偿。

1)冷端恒温法

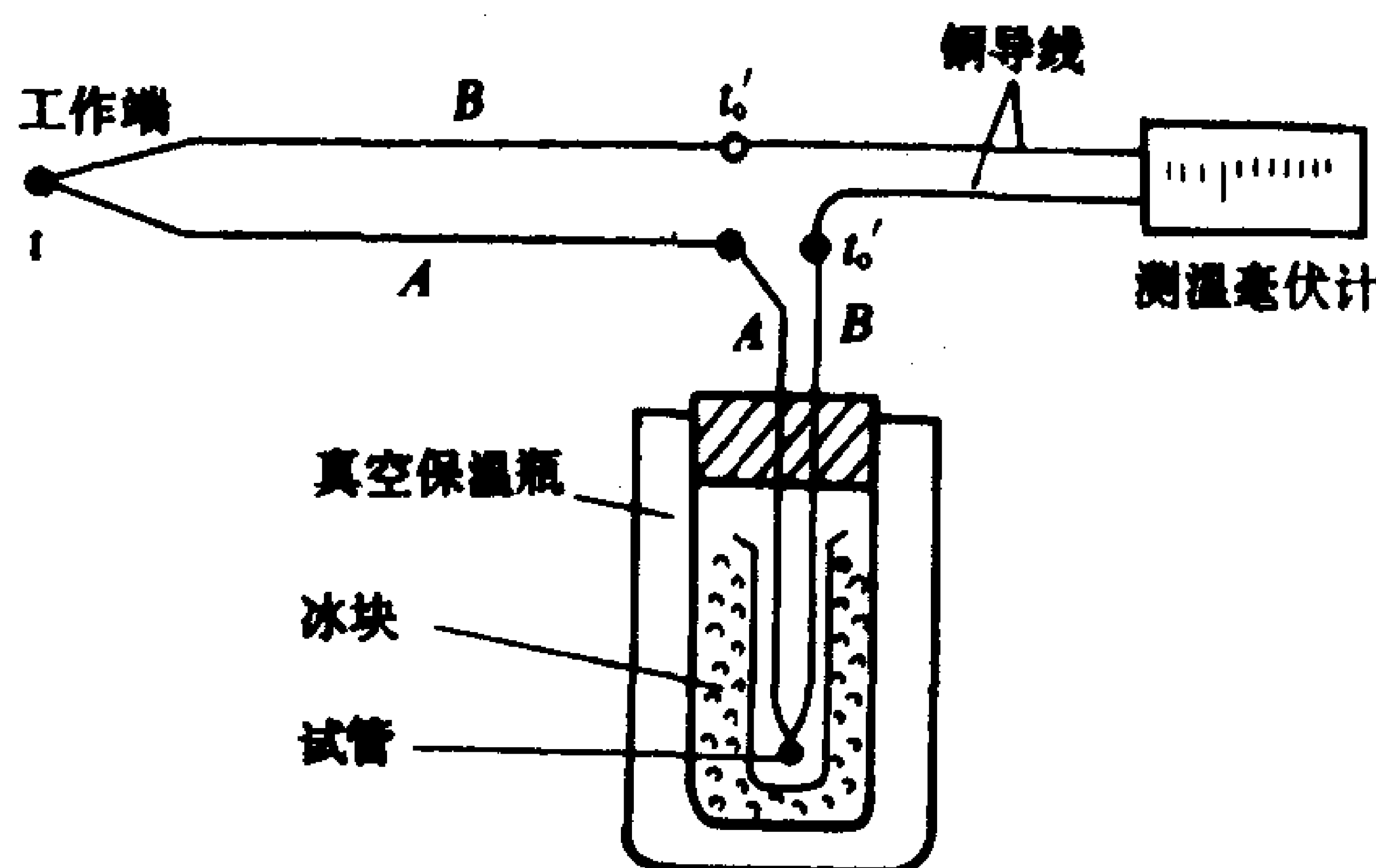


图 1.2.1-46 保持冷端温度为 0℃ 的测温方法

在实验室的试验中，通常将冷端放入装有冰水混合物的保温容器中，使容器保持 0℃不变。这种方法比较精确。也可以将冷端放入盛油的容器内，利用油的热惰性保持冷端近似于

室温。或者将容器做成带有水套的，让流经水套的冷却水来保持容器温度的稳定。如图1.2.1-46所示。是用冰、水容器来保持冷端温度为0℃的测温方法示意图。图中表示出用两支相同分度号的热电偶，其中一支主热电偶的接点感受被测温度 t，另一支辅助热电偶的接点置于盛有少量油的试管中，并保持为0℃，两热电偶的同质电极（图中热电极 A）相接。当另一电极 B 与铜导线连接处的温度保持一致（t_0），则电路中不会产生其他附加电势，使测量温度的毫伏计的读数只随热端温度 t 而变化。

2）冷端温度校正

热电偶的分度是在冷温度保持0℃的条件下进行的，在实际使用的条件下若冷端温度 $t_n \neq 0$℃时，此时热电偶两端点的温度差为 t、t_n 则测得的热电势为 $E_{AB}(t,t_n)$ 与 $t_0=0$℃时所得的热电势 $E_{AB}(t,\ 0)$ 不一样。当 $t_n \neq 0$ 时的热电势为：

$$E_{AB}(t,0)=E_{AB}(t,t_n)+E_{AB}(t_n,0) \quad (1.2.1\text{-}76)$$

式中，$E_{AB}(t,t_n)$ 为实际测得值，而 $E_{AB}(t_n,0)$ 可由热电偶分度表查得，这样根据式（1.2.1-76）可以求得 $E_{AB}(t,0)$ 值，然后再根据热电偶分度表查得被测介质的真实温度。

例如：用镍铬—镍硅热电偶测得某介质的温度为800℃，但此时自由端的温度为30℃，由热电偶分度表 EV-2 可以查得800℃ 时的热电势为33.29 mV 即 $E(t,t_n)$。30℃时的热电势为1.20 mV，即 $E(t_n,0)$。故

$$E(t,0)=E(t,t_n)+E(t_n,0)$$
$$=33.29+1.20=34.49\,\text{mV}$$

查热电偶分度表所知被测介质的真实温度是829.6℃，这种方法比较精确，但是繁琐。因此工程上还常用简化的方法，可以预先把显示仪表的指针从刻度起始值调到已知的冷端温度，这样就相当于把校正值直接加到显示仪表上了，但这只有当所用热电偶为线性分度的情况下才是正确的，并且冷端温度不应有变化。

3）延引热电极法

这是当工作热电偶的冷端温度在较大范围内变化时采用的补偿方法。

它将热电偶冷端引到温度值已知的地点（冷端移到远离热壁的地点），并维持冷端的温度近于恒定。这种方法必须满足以下两个条件，一是在一定温度范围内，引延热电极必须与热电偶的热电极具有相同或近似的热电特性，二是引延热电极与热电偶的两接点必须具有相等的温度。

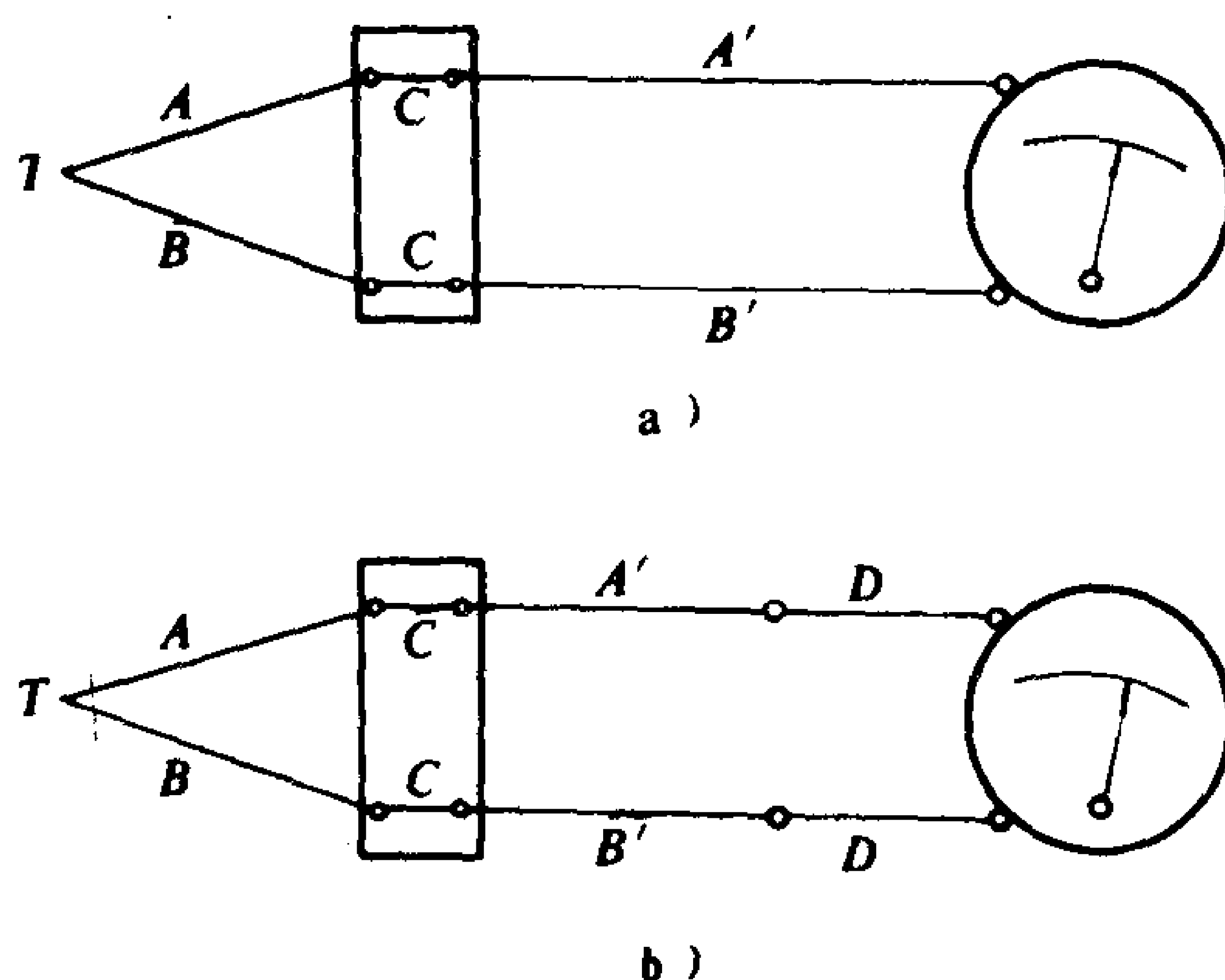


图1.2.1-47 测量某点温度的基本电路
a）冷端被延伸到仪表内；b）冷端在仪表外面
AB-热电偶；$A'B'$-补偿导线；C-铜接线柱；D-铜导线

表1.2.1-4表示了几种常用延引热电极及其特性参数，在使用时要注意电极的色标，因为它用颜色来表示极性，与热电偶相接时不要接错极性。

表 1.2.1-4　　　　　　　　　　　　　**延引热电极及其技术参数**

延引热电极种类		EU	EA	LB	
配用热电偶		镍铬-镍硅 镍铬-镍铝	镍铬-考铜	铂铑$_{10}$-铂	钨铼$_5$-钨铼$_{20}$
电极材料	正　极	铜	镍　铬	铜	铜
	负　极	康　铜	考　铜	铜　镍	铜 1.7~1.8% 镍
色　标	正　极	红	红	红	红
	负　极	蓝	黄	绿	蓝
$t=100℃$ $t_0=0℃$ 时的热电势 mV		4.10±0.15	6.95±0.3	0.643±0.023	1.337±0.045
$t=150℃$ $t_1=0℃$ 时的热电势 mV		6.13±0.20	10.59±0.3	$1.025^{+0.024}_{-0.055}$	
20℃ 时的电阻率 Ω·m		$<0.634\times10^{-6}$	$<1.25\times10^{-6}$	$<0.0484\times10^{-6}$	

2.6.4 测量电路

1)测量某点温度的基本电路

图 1.2.1-47 是一个热电偶和一个仪表配用的基本连接电路。对于图 1.2.1-47 a)只要 C 的两端温度相等对测量精度无影响。图 1.2.1-47 b) 是冷端在仪表外面(如放于恒温器中)的线路，如配用仪表是动圈式，则延引导线电阻应尽量小。

2)利用热电偶测量两点之间温度的连接

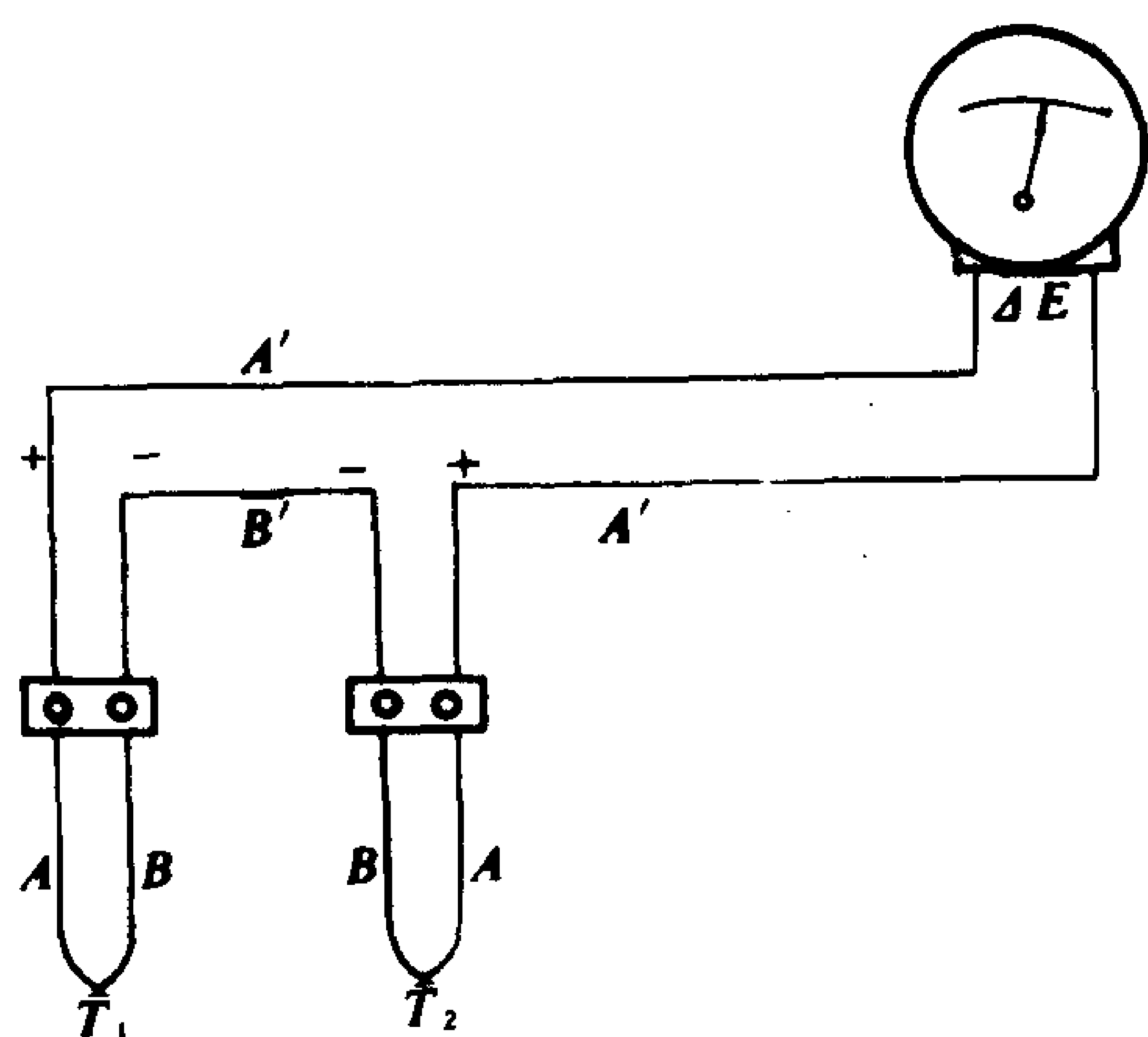


图 1.2.1-48　热电偶测温差连接电路

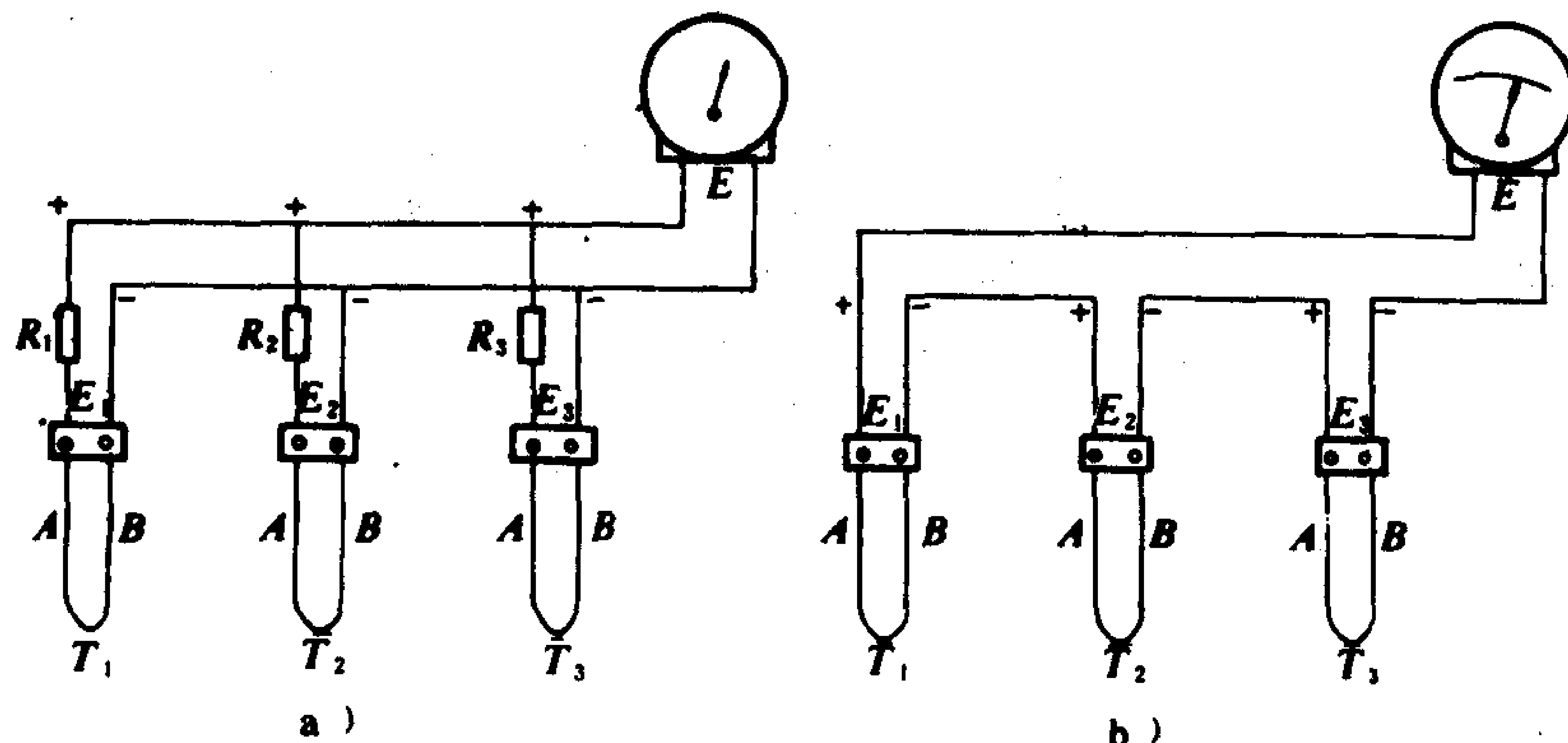


图 1.2.1-49　热电偶测量平均温度连接电路
a)并联电路；b)串联电路

电路

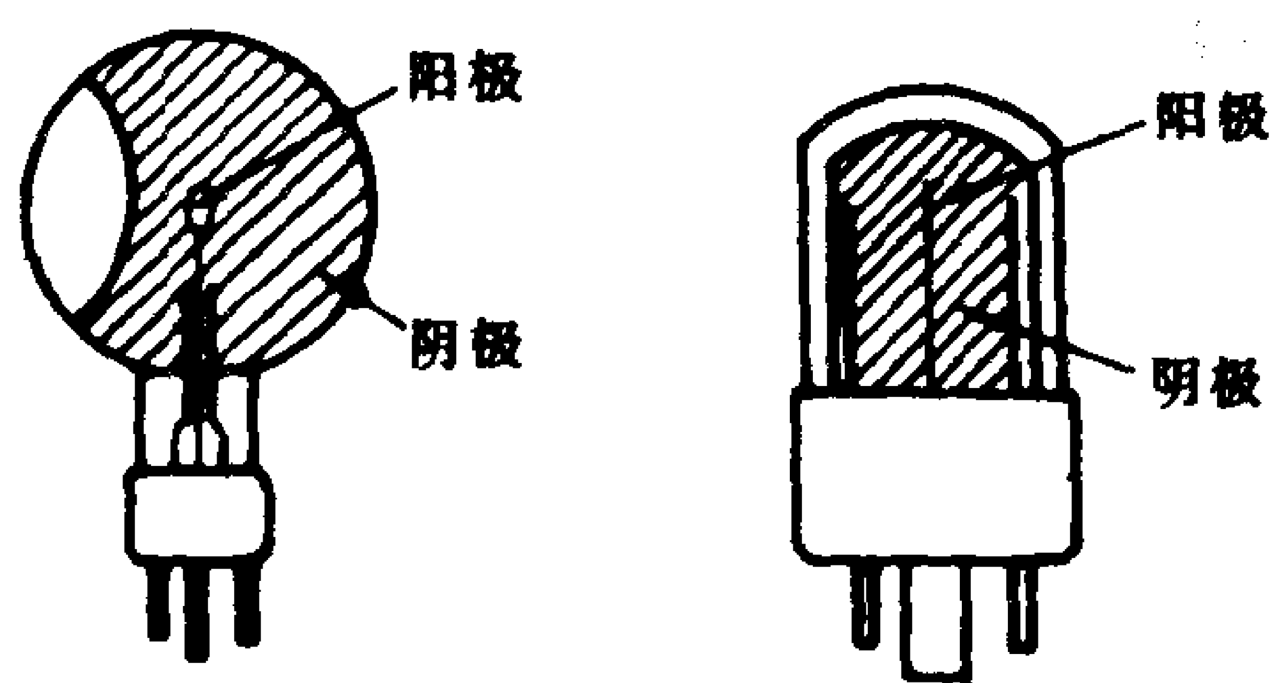


图 1.2.1-50　典型光电管外形

图 1.2.1-48 是测量两点之间 t_1, t_2 温度差的一种方法，两支同样型号热电偶配用相同的延引导线，接线使两热电势互相抵消，可测 t_1 和 t_2 间的温度差值。两支热电偶新的冷端温度必须一样，它们的热电势 E 都必须与温度 t 呈线性关系，否则将产生测量误差。

3)利用热电偶测量设备中的平均温度

图 1.2.1-49 是测量平均温度的连接电路，在图 1.2.1-49 a) 中，输入到仪表两端的毫伏值为三个热电偶输出热电势的平均值，即 $E=\frac{E_1+E_2+E_3}{3}$ 如三个热电偶均工作在特性曲线的线性部分时，则代表了各点温度的算术平均值，为此每个热电偶需串联较大电阻。此种电路的特点是仪表的分度相同。其缺点是当某一热电偶烧断时不能很快地觉察出来。

在图 1.2.1-49 b) 中输入到仪表两端的热电势为三个热电偶产生的热电势之和，即 $E=E_1+E_2+E_3$ 可直接从仪表读出平均值，此种电路的优点是热电偶烧坏时可立即知道，另外可获得较大的热电势。。

应当指出的是，使用以上两种电路时，必须避免测量点接地。

2.7　光电式变换器

光电变换器是将光通量转换成电量的一种变换器，若用这种变换器测量其他非电量时，只要将这些非电量的变化转换成光信号的变化即可。

2.7.1　光电元件和特性

1)光电管

光电量有许多类型，其中最典型的两种光电管的外型如图 1.2.1-50 所示。

在真空玻璃泡内装有两个电极，一个是对光敏感的光电阴极。另一个是位于阴极前面的装有单根金属丝或环状的阴极。当阴极受到光线照射便发射电子。带正电位的阳极吸引电子。这样与外电路连接的光电管就有电子流动，于是在电路的负载电阻上产生电压降，实现了光电转换。

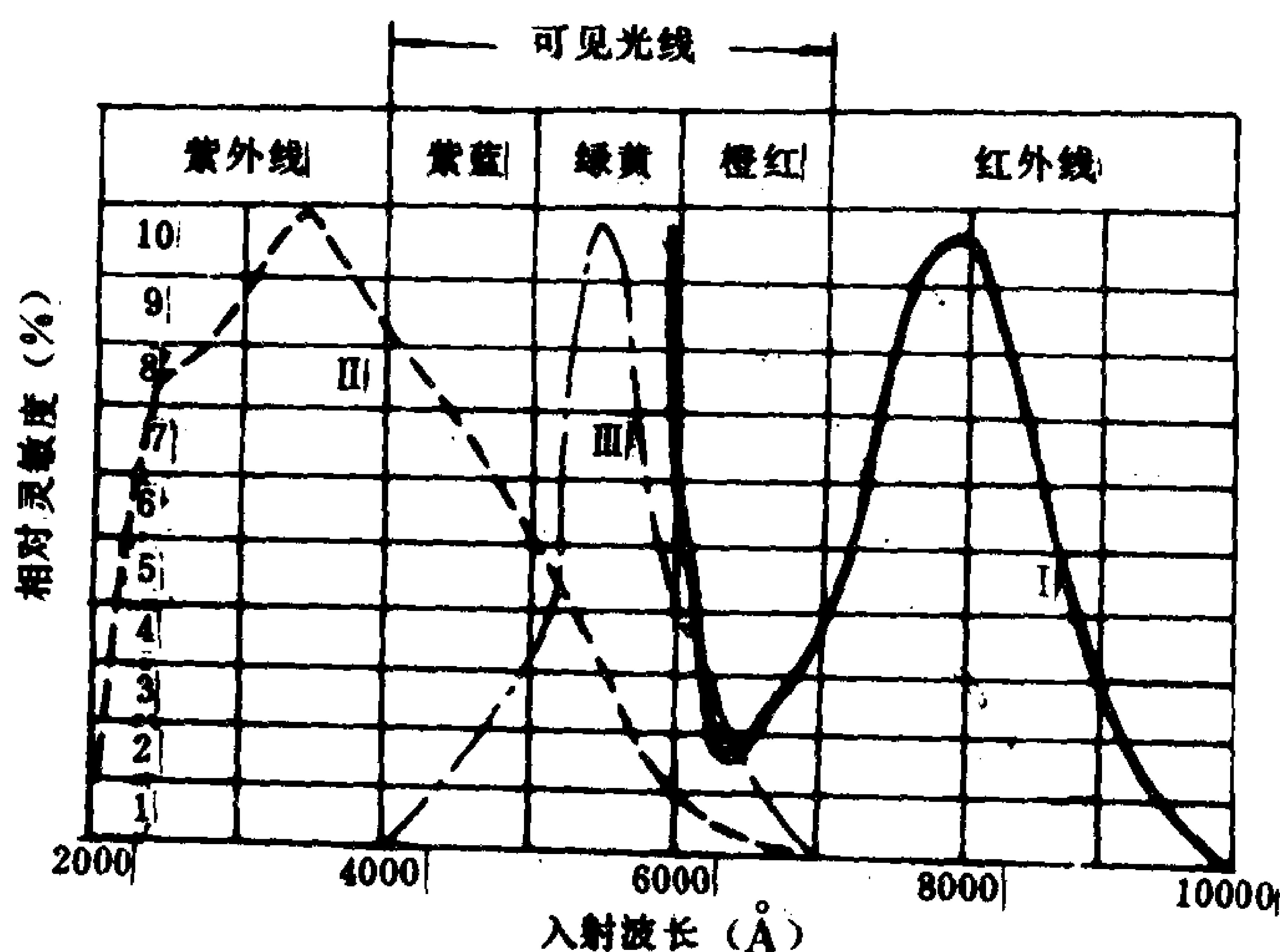


图 1.2.1-51　光电管光谱特性与视觉光谱特性的比较
I-铯氧银阴极；II-锑铯阴极；III-人的视觉光谱特性

光电管的特性由以下参数表示：

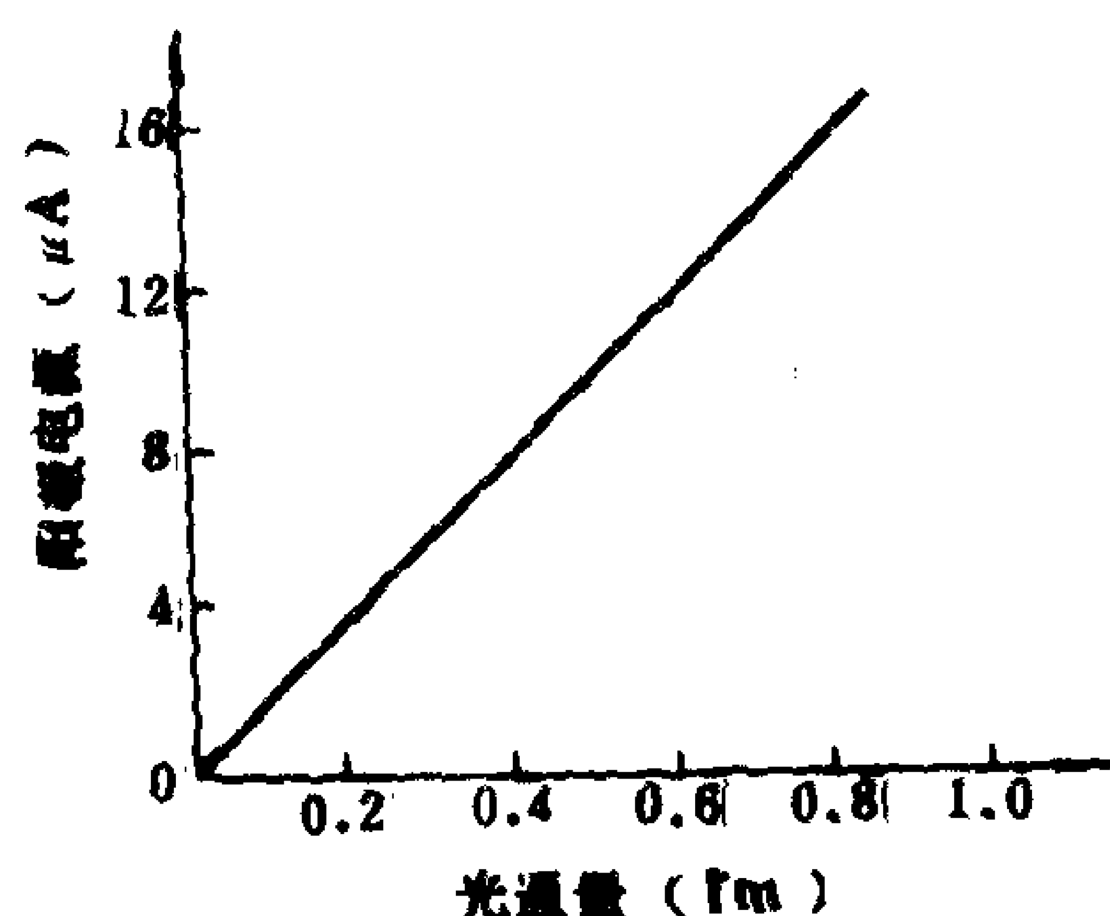


图 1.2.1-52　真空光电管的光电特性曲线

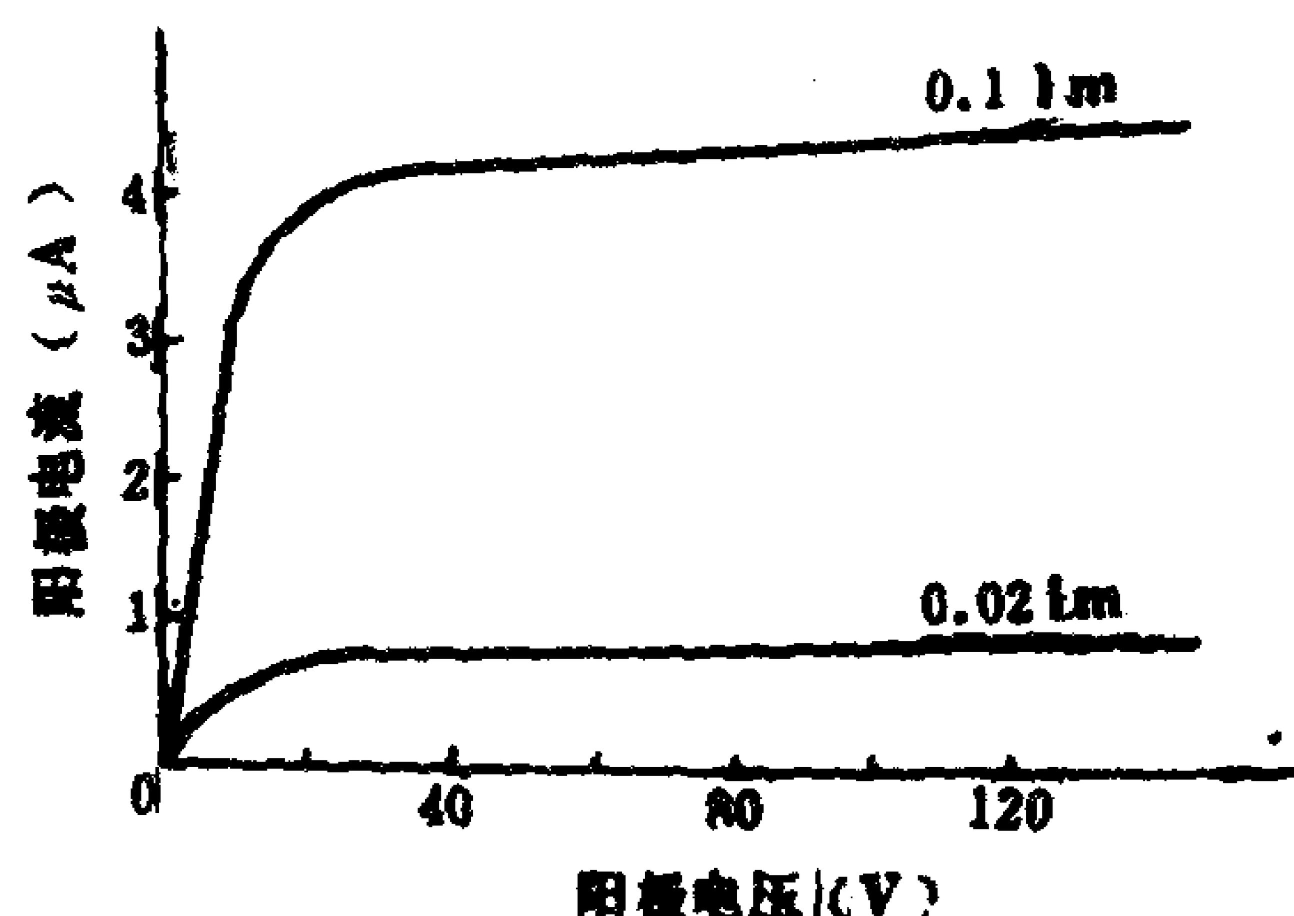


图 1.2.1-53　真空光电管的伏安特性曲线

（1）光谱特性

表示光电管阴极对不同波长的光线有不同的灵敏度，因而阳极电流也不一样，不同材料对同一波长的光源敏感程度也不一样，如图 1.2.1-51 所示。

由光谱特性曲线可以看出，对于不同波长区域的光，应选用不同光电阴极的光电管。此外，光电管的光谱特性和人的视觉光谱特性有很大不同，所以在测量与控制技术中，光电管可以担负人眼不能胜任的工作。

(2)光电特性

表示光电管在固定阳极电压下，光通量与光电流（阳极电流）之间关系，如图 1.2.1-52 所示。光电管的光电特性基本上呈线性关系，直线的斜率为其灵敏度。

（3）伏安特性

表示在光通量一定的情况下，阳极电压与阳极电流的关系曲线，如图 1.2.1-53 所示，在阳极电压大于 50 V 时，阳极电流近于常数，而与电压无关。

真空光电管除上述三种特性外，还有温度特性、疲劳特性、惯性特性等，它们也由于不同使用目的而有所不同。

2)光敏电阻

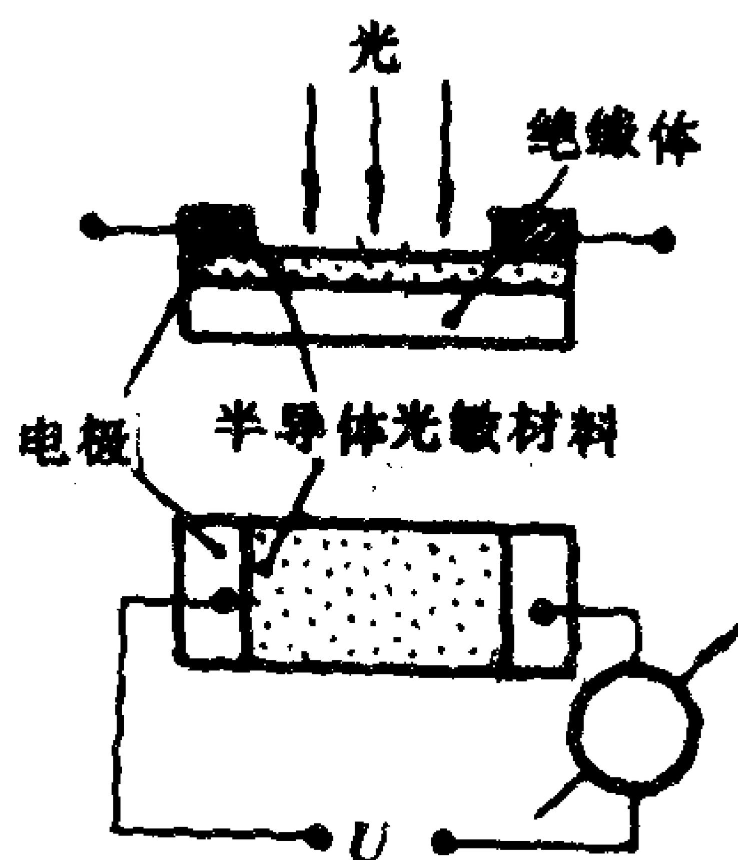


图 1.2.1-54
光敏电阻结构原理图

有些半导体（如硫化镉等）在黑暗环境下，它的电阻很高，但当它受到光线照射时，就会激发出电子——空穴对，从而加强了导电性能使电阻降低，且照射的光线愈强，电阻也变得愈低。光照停止，自由电子与空穴逐渐复合，电阻又恢复原值。这种现象又称光导效应，而具有光导效应的半导体材料就称为“光敏电阻”用光敏电阻制成的元件称为“光导管”。

光导管结构比较简单，如图 1.2.1-54 所示。即在半导体光敏材料两端装上电极引出线即可，如果将光导管与电阻串联同时联结电源，当光照到光敏材料上时，它的阻值就急剧下降，在电阻两端即有电信号输出。

由于光敏电阻具有很高的灵敏度，光谱响应的范围可以从紫外

区域到红外区域，而且体积小，性能稳定，价格较低，所以被广泛应用在自动化技术中。

光敏电阻的特性由以下参数表示

（1）光电流

光敏电阻在不受光照射的电阻值称“暗阻”，此时流过的电流称“暗电流”。光敏电阻在受光照射时的电阻值称“亮阻”，此时的电流称“亮电流”。亮电流与暗电流之差，即为“光电流”。

（2）光谱特性

光敏电阻对于不同波长的入射光，其相对敏感程度是不同的。各种材料的光谱特性曲线，如图 1.2.1-55 所示。

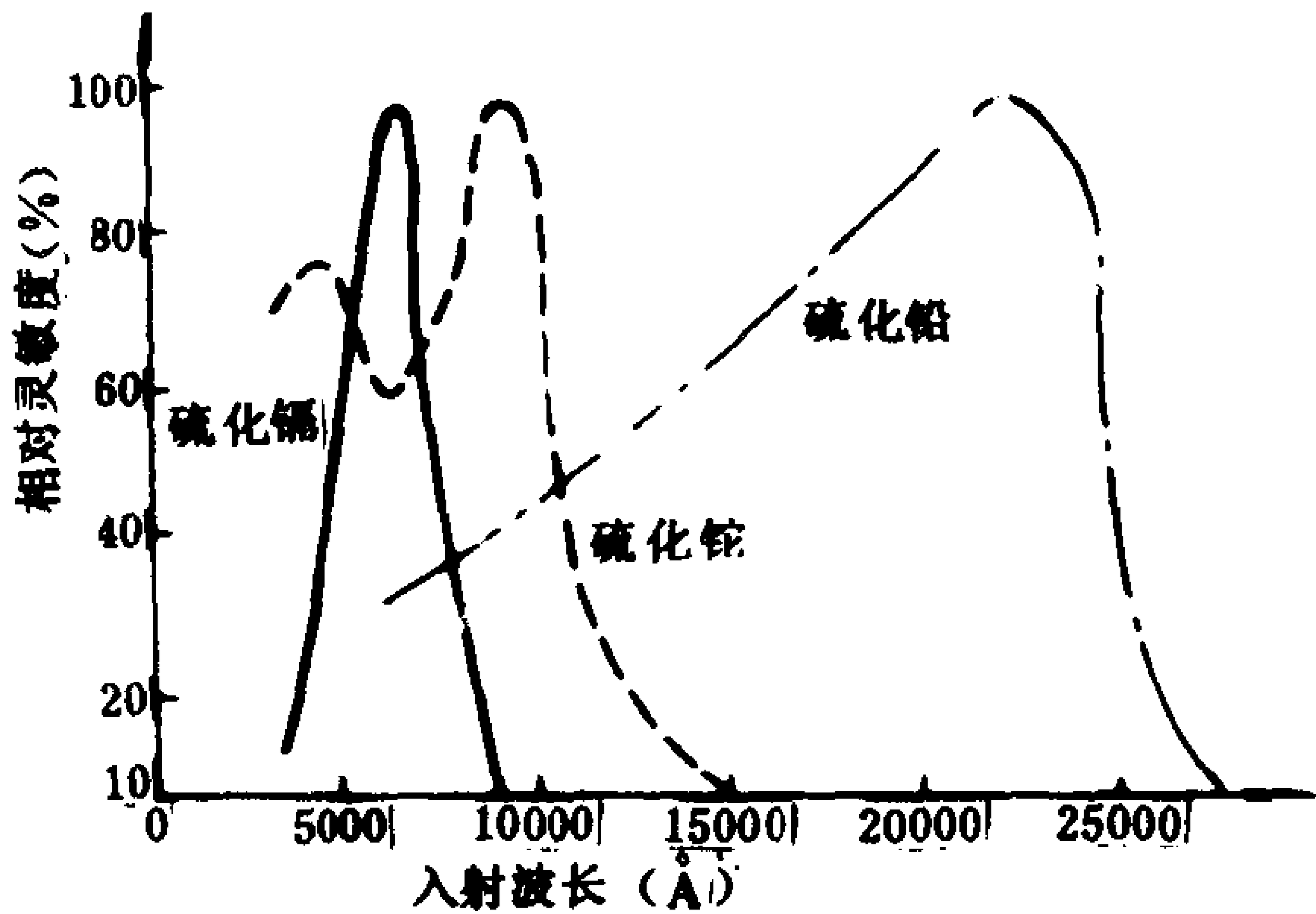


图 1.2.1-55 光敏电阻的光谱特性曲线

（3）光谱温度特性

光敏电阻和其它半导体器件一样、它的光学与电学性能受温度影响较大，随着温度的升高，它的暗阻和灵敏度都下降。同时湿度变化也影响它的光敏特性曲线，如图 1.2.1-56 所示，表示出硫化铝的光谱温度特性，即在不同温度下的相对灵敏度 K 和入射波长 λ 的关系。从图中看出，它的峰值随温度上升向短波方向移动。因此有时为了提高元件的灵敏度，或为了能接受红外光而采取降温措施。

3)光电池

光电池是一种直接把光能转换成电能的元件。

光电池的特性由以下参数表示

（1）光谱特性

图 1.2.1-57 中曲线为硒光电池和硅光电池的光谱特性曲线，即相对灵敏度和入射光波长间的关系曲线。

从曲线上可以看出，不同材料的光电池的光谱峰值位置是不同的，如硅光电池可在 0.45～1.1 μm 范围内使用。而硒光电池只能在 0.34～0.75 μm 范围内使用。在实际中就可以根据光谱特性曲线选择光源性质和光电池。

（2）光照特性

图 1.2.1-58，为硅光电池的光照曲线，从中看出：短路电流在很大范围内与光照度成线性关系，开路电压与光照度的关系是非线性的。在照度为 2000 勤克司照度时，就趋于饱和，因此把光电池作为检测元件时，应该把它当作电流源的形式使用、这是光电池的优点之一。而不能用电压源来进行测量。

3 轮机常用测量仪器仪表及其使用

3.1 转速测量仪表

3.1.1 离心式转速表

它可分手持式和固定式两种，这种转速表因测量简单、价格便宜，故获得最广泛的应用。

国内生产的型号及厂家较多，分别可测量几十转到上万转的转速。它的性能稳定，用于调整监测、检查、控制发动机的运转工况是非常理想的。但若用于发动机的性能试验中，由于这种转速本身精度不高，会使测量结果带来较大误差。

在使用离心式手持转速表时，应注意以下几个问题：（1）应预先估计被测轴最高转速。若无法估计，可先从高转速挡开始试测，直至合适量程，使用中不得更换量程。（2）选用合适的接头。（3）转速表与被测轴相接时，两者应在同一轴线上。（4）接头压在被测轴上时，用力要适当。一次接触时间一般不应超过 30 秒。

3.1.2　磁性转速表

这种转速表是根据电磁感应原理制成的。其结构原理，如图 1.2.1-59 所示。旋转磁铁 2 和柔韧的轴 1 与受试验的轴连。在旋转磁铁 2 的磁场内安置有金属盘 3，在与金属 3 固结在一起的轴上装有弹簧 4 和指针 5。

当磁铁旋转时，在盘 3 中感应出电势，产生电流。它和磁铁的旋转磁场间相互作用力产

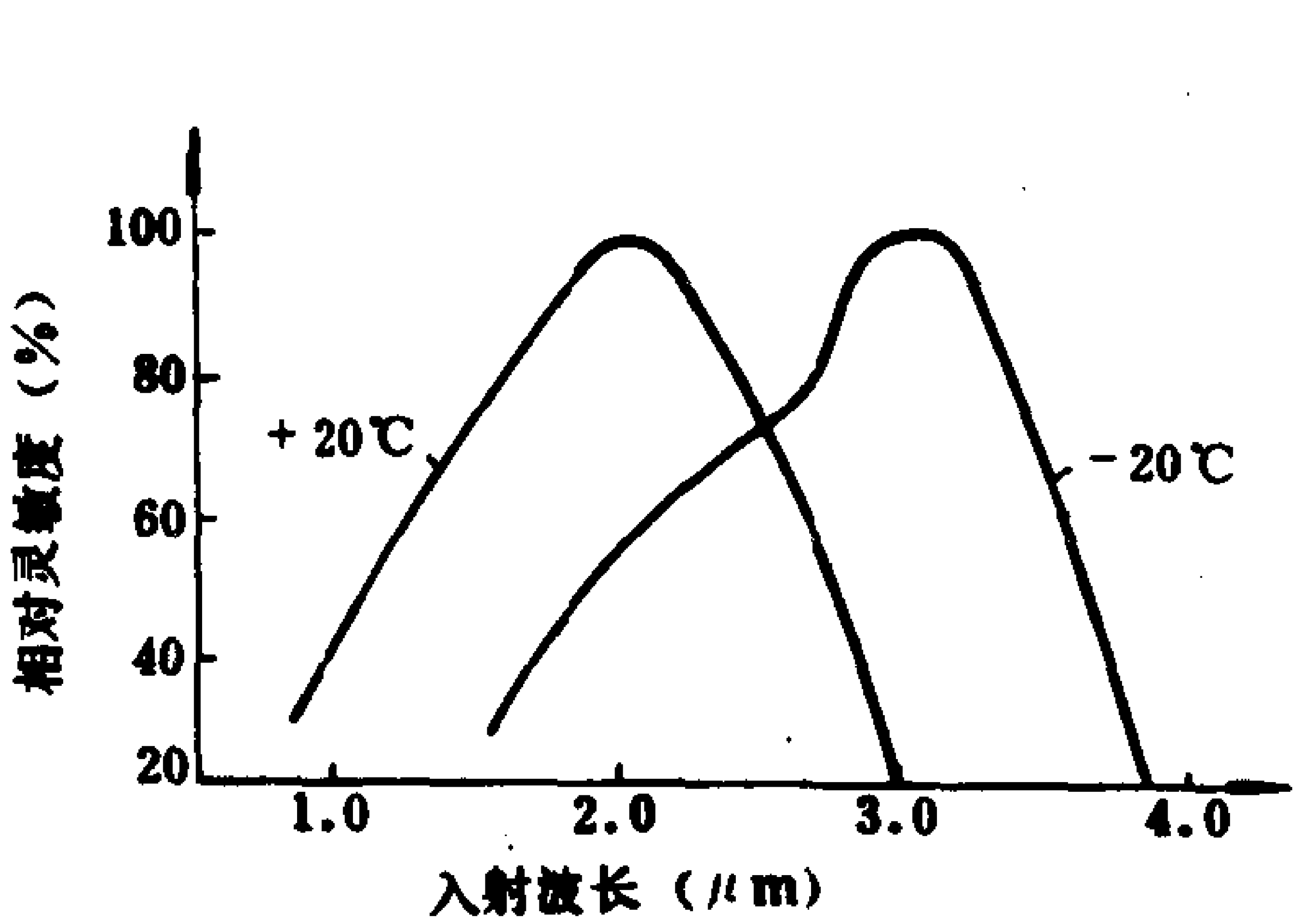


图 1.2.1-56　硫化铅的光谱温度特性

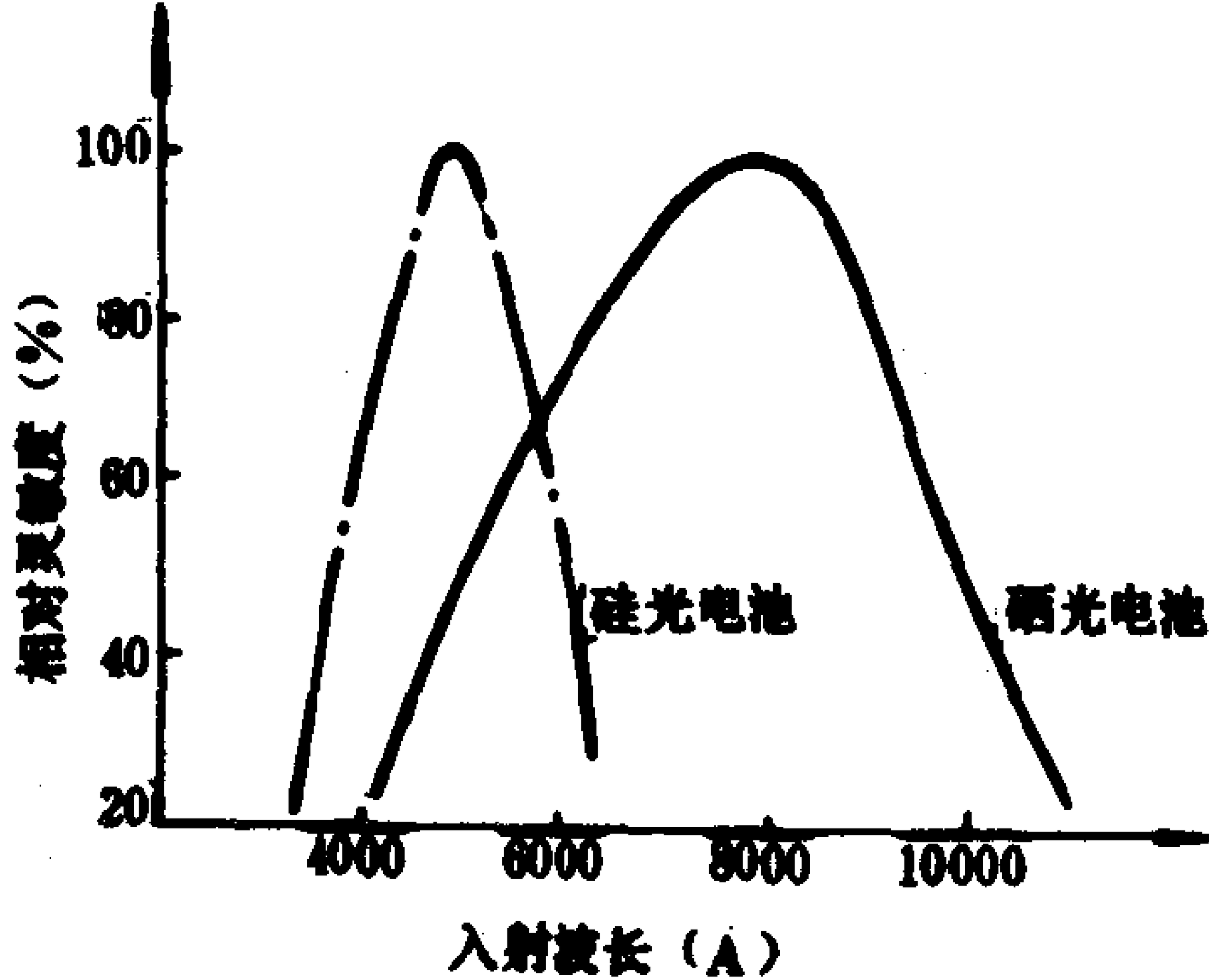


图 1.2.1-57　光电池的光谱特性曲线

生作用在盘 3 上的力矩，并使得盘 3 转向磁铁的旋转方向，这个力矩由弹簧 4 的反作用力矩所平衡，这时指针 5 所指示的偏转，正比于所测量轴的转速。

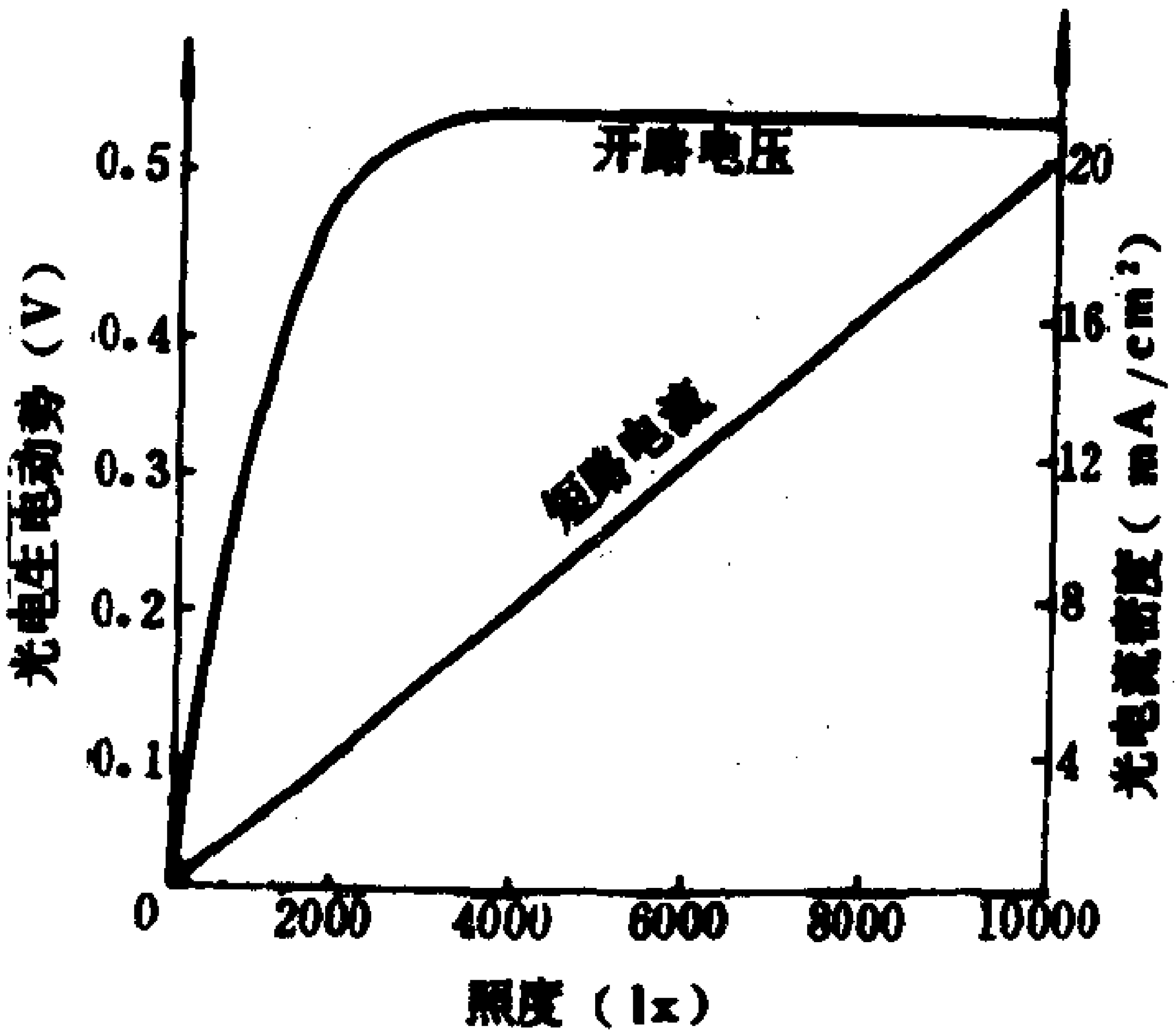


图 1.2.1-58　硅光电池的光照特性曲线

这类仪表的优点是结构简单、刻度均匀。缺点是温度对精度的影响较大。

3.1.3　数字式转速表

数字式转速表能够直接用数字来显示转速的数值。具有测量准确，使用方便，易于实现自动测试等优点，因而获得越来越广泛的应用。数字式转速表是通过测速传感器将转速信号变换成电脉冲信号，然后用电子计数器来计量的。所以它主要由传感器和电子计数器两部分组成。

1）磁电式传感器

磁电式传感器是基于以前讲过磁电式变换器原理，这种传感器通常采用输入电势的频率值，如

图 1.2.1-60 所示，传感器的线圈和磁铁部分都是静止的，加工有 N 个齿的齿轮 1 安装在旋转轴（如曲轴）上，永久磁铁距离顶端约 0.5～1 mm，轮 1 随被测轴以 n 转/分速度旋转。其齿顶及齿槽交替经过传感器并切割磁力线。因磁隙变化而引起磁阻变化，在线圈中感应电势也随之变化而输出一个感应电势脉冲，传感器输出脉冲频率 f 由下式求出：

$$f = Nn/60 \quad \text{Hz} \tag{1.2.1-77}$$

设当 N 取为 60 时，则得到 $f=n$，即脉冲频率数恰好等于转速 n。脉冲频率输入到电子计数器即可直接读出 n 值来。

在示功图测量中，亦可用这种传感器测录上止点信号和曲转转角信号。由于这种传感器具有输出信号强，结构简单，工作可靠等优点，而获得最广泛的应用。

2）光电式传感器

光电式测速传感器是利用光电变换原理将被测轴的转速转换为电脉冲信号。结构形式有透过式和反射式两种，如图 1.2.1-61 所示。

透过式光电测速传感器，如图 1.2.1-61 a）所示，带窄缝（或孔）的圆盘可由被测轴驱动，当圆盘旋转时，光源通过窄缝脉动地照射光电管，光电管被照射时，其反向电阻很低，于是在输出端输出一个电脉冲信号，而当圆盘转到遮住光线位置时，光电管反向电阻很大，输出端即无信号输出。

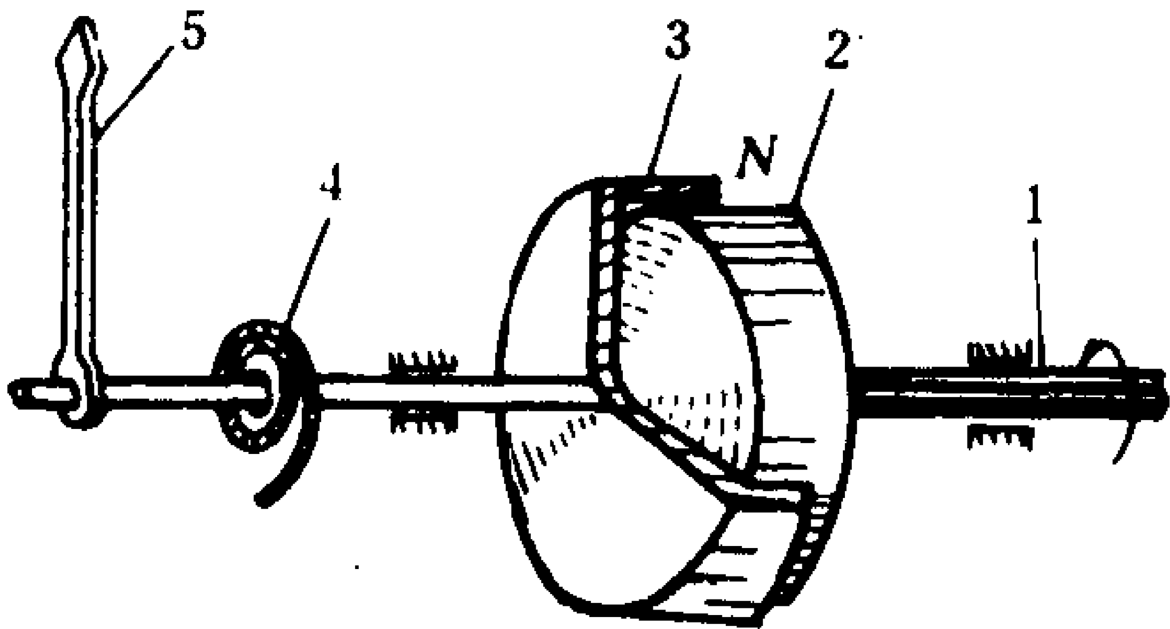


图 1.2.1-59　具有旋转磁场的感应式转速表
1-轴；2-旋转磁铁；3-金属盘；4-弹簧；5-指针

反光式测速传感器工作原理，如图 1.2.1-61 b）所示，光源 1 和光电管 2 装在适当位置，被测轴 3 上涂以白漆或粘贴反光材料 4 形成一个反射面，光反射面转到某一角度时，反光材料 4 将光源射来光束反射给光电管 2，而使其输出端输出一个电压脉冲信号。

用反射法测量转速，被测轴与传感器不需要机械联系，因而使用比较方便。光电管输出波形不受转速影响，干扰信号不易产生，但不如磁电式耐用。

3）电子计数器

电子计数器接受测速传感器送来的脉冲信号并对脉冲信号进行放大、整形、控制、记录显示等。

3.1.4　闪光测速仪

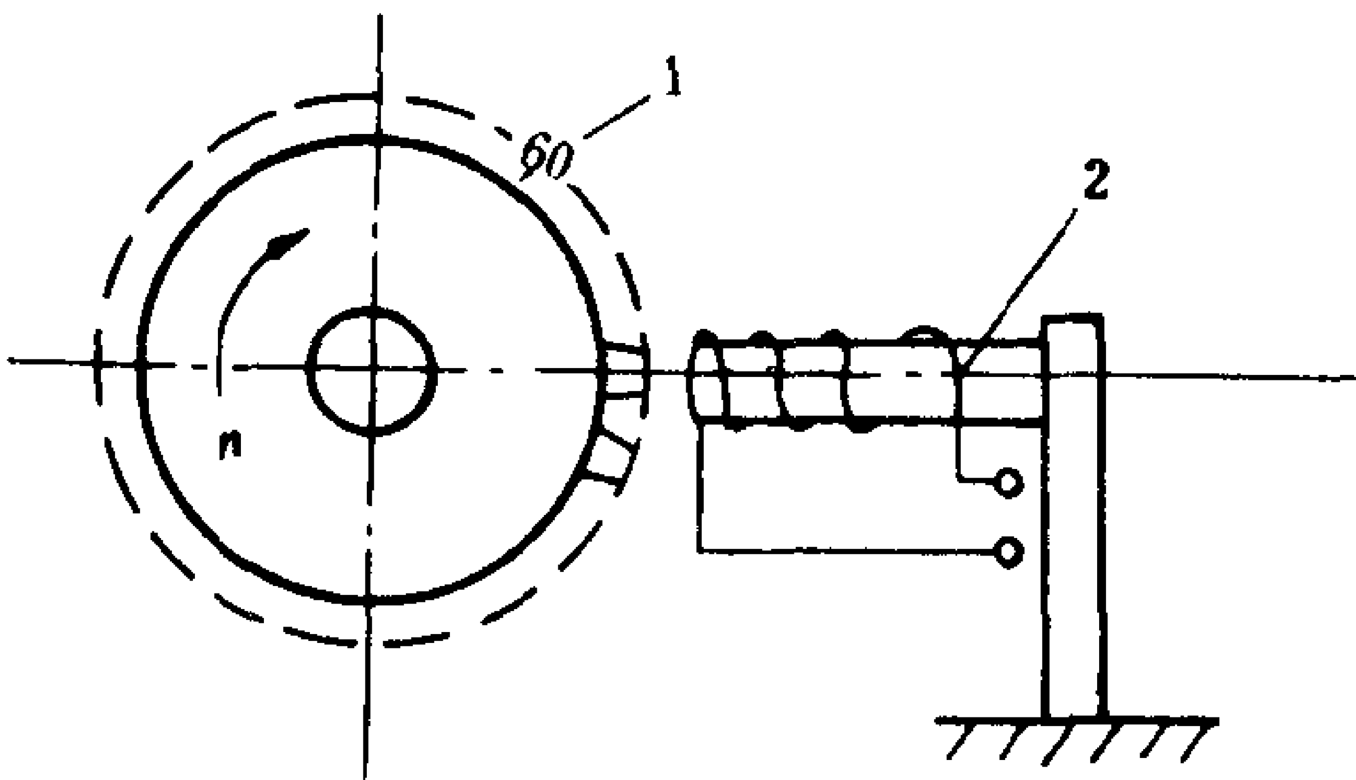


图 1.2.1-60　磁电式测速传感器
1-齿轮；2-线圈；

闪光测速仪实质上是一可变闪光频率的闪光灯。根据需要，可调整发出指定频率的闪光脉冲，并由本身的数字频率计示值。若当由闪光测速仪发出的强脉冲光线照射到被测机械的旋转轴上并调整到旋转轴的转速（频率）与闪光频率一致时，则被测转轴看起来好象是不动的，此时即可由闪光测速仪读出转速。其原理是：假如我们在被测轴截面边缘上画一醒目标

志 A，由于两者频率一致，测速仪每次闪光时间均在标志 A的同一方位，如图 1.2.1-62 中 a)所示，均在转轴的最上方，又由于人的眼睛的"视觉暂留现象"，即在短暂时间内保留已看到的但已消失掉的视觉图象，所以每次闪光时出现的 A 线图象便连接成一不动的完象。

根据上述道理，若被测转速（频率）为闪光频率的 2 、 3 …… K倍（K为整数）时，则要出现间隔均匀的二个三个……K 个完象 A如图 1.2.1-62 b)、c)。这样又如何判断一个完象 A 时的转速呢？举一例来说明，设某一柴油机在以低于 3000 r/min 的某一转速运转，若恰好闪光频率在 1400 处出现完象，此时柴油机转速可能在 1400 r/min，也可能在 2800 r/min。为作出正确判断，可将闪光频率调在 2800 处，若仍是单完象，说明柴油机转速为 2800 r/min。

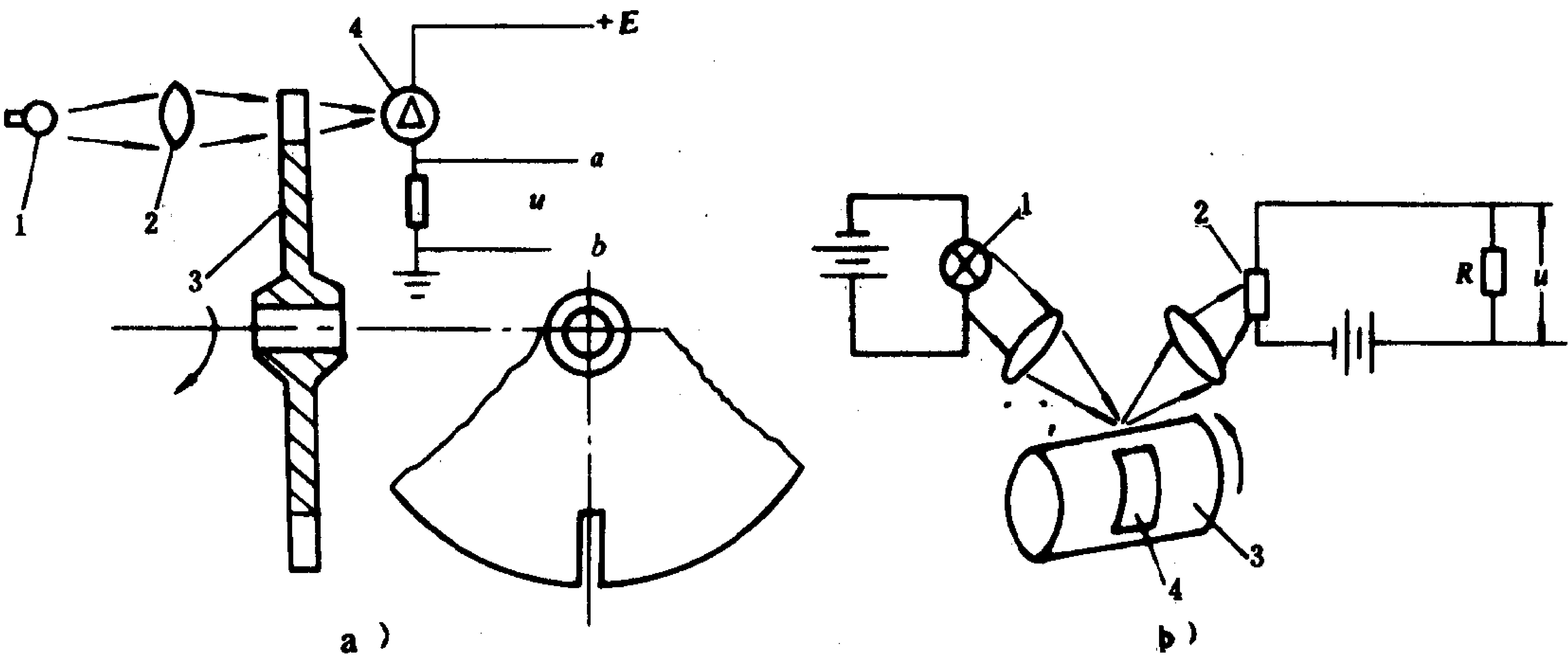


图 1.2.1-61 光电式测速传感器

a）透过式光电测速传感器
1-光源；2-透镜；3-圆盘；4-光电管

b）反光式光电测速传感器
1-光源；2-光电管；3-被测轴；4-反光材料

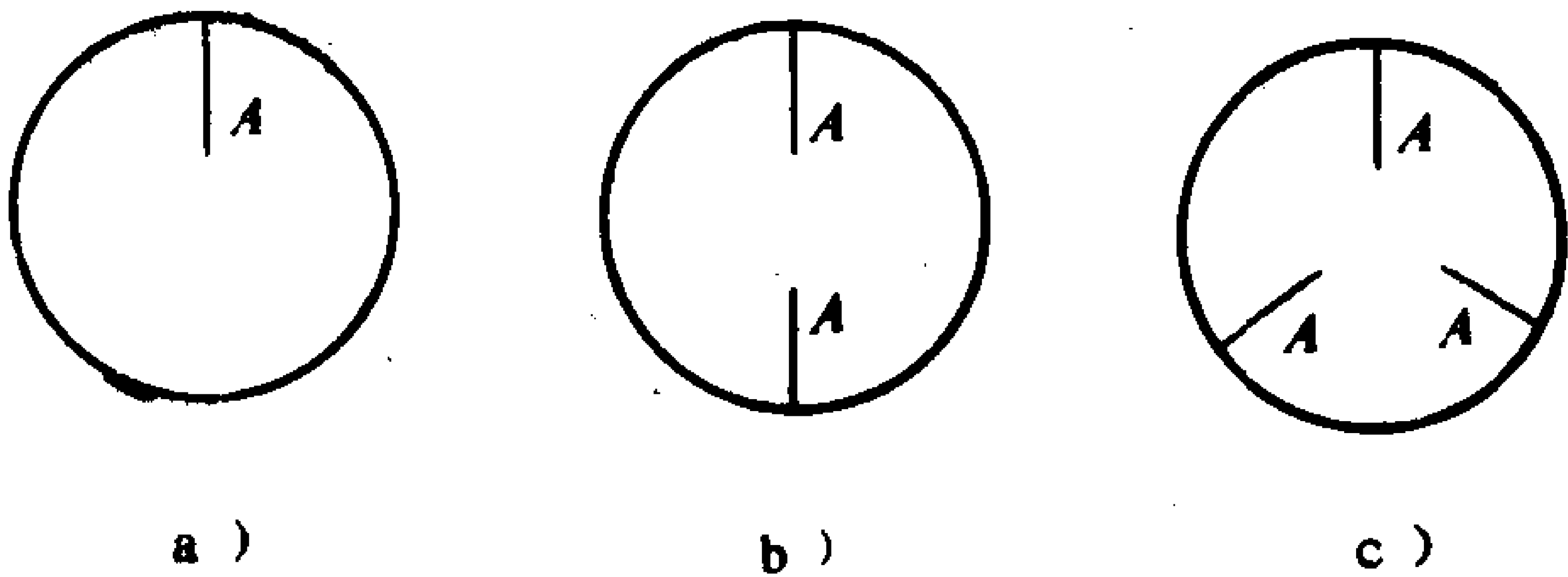


图 1.2.1-62 闪光图象示意图

目前，常用柴油机转速表的分类与性能如表 1.2.1-5。

表 1.2.1-5　　**柴油机转速表分类与性能**

型式		仪表名称	测量原理	主要特点	精度	应用范围
接触式	机械式	离心式转速表	利用旋转重环离心力与轴转速平方成正比	结构简单、使用方便、价格便宜、稳定性好，但不可连续使用	0.5～2	分档 30～24000 r/min 监控调整
		定时转速表	使用钟表计时机构与齿轮式计数机构，测定在一定时间间隔内被测轴的转数	结构简单、使用方便、表盘刻度均匀、指针无波动，但不可连续测量	0.25～0.5	100～25000 r/min
	电气式	感应式转速表	使用电磁感应原理使圆盘所受力矩与转速成正比	结构简单、对振动敏感小，对温度变化敏感大	1.5～2	0～20000 r/min 广泛、监控
		电动转速表	利用交、直流发电机输出电压与转速成正比	可远距离指示，易受磁场和温度变化影响	1～2	0～20000 应用广泛可测瞬时转速
非接触式	数字式	磁电式	利用磁路磁阻的变化把转速信号变换成相应的电脉冲信号输出	结构简单、工作可靠、脉冲信号不因转速过高而减弱脉冲信号欠规整，须整形，易产生干扰信号	0.01～0.1	100000 r/min 应用广泛适于低、中、高速可测瞬时转速
		光电式	利用光电效应使轴转速变换成电脉冲信号输出	结构复杂、对振动敏感脉冲信号在转速过高时减弱。脉冲信号规整，无干扰信号	0.01～0.1	不适于高于 10000 r/min 可测瞬时转速
		红外线	使用高亮度、低发散角的单色相干光源，利用光电效应使转速信号变换成电脉冲信号输出	不受可见光或振动干扰，可远距离测速	高精度	
	同步式	闪光测速仪	根据“频闪效应”求出与旋转轴同步的闪光频率	使用方便、直接读数量程宽、闪光频率可无级调节	0.01～2	分档 100～24000 r/min 间接测量法可扩大: 240000 r/min

3.2 压力测量仪表

常用的测压仪表大致有：液柱式压力计，弹性式压力计和其他形式的压力计。

3.2.1 液柱式压力计

它的基本原理是流体力学有关定律，基本形式有：

1)U形管压力计

如图 1.2.1-63 所示，这是最简单压力计，压力差由管内液柱高度表示。

U形管内径一般为 5～20 mm，为了减少毛细现象对测量准确度的影响，内径最好不小于 10 mm读数时眼睛应与液面平齐，以封液弯月面部切线为准读取液面高度。

2)斜管式微压计

这是用来测量流体压差较小时的仪表。具有灵敏、精度较高的特点。可以测量微小的正压负压和差压。图 1.2.1-64 为斜管式微压计原理图。测量正压时，被测压力通入大容器，测量负压时，被测压力通入肘管。测量差压时，将较高压力通入大电容器，而将较低的压力通

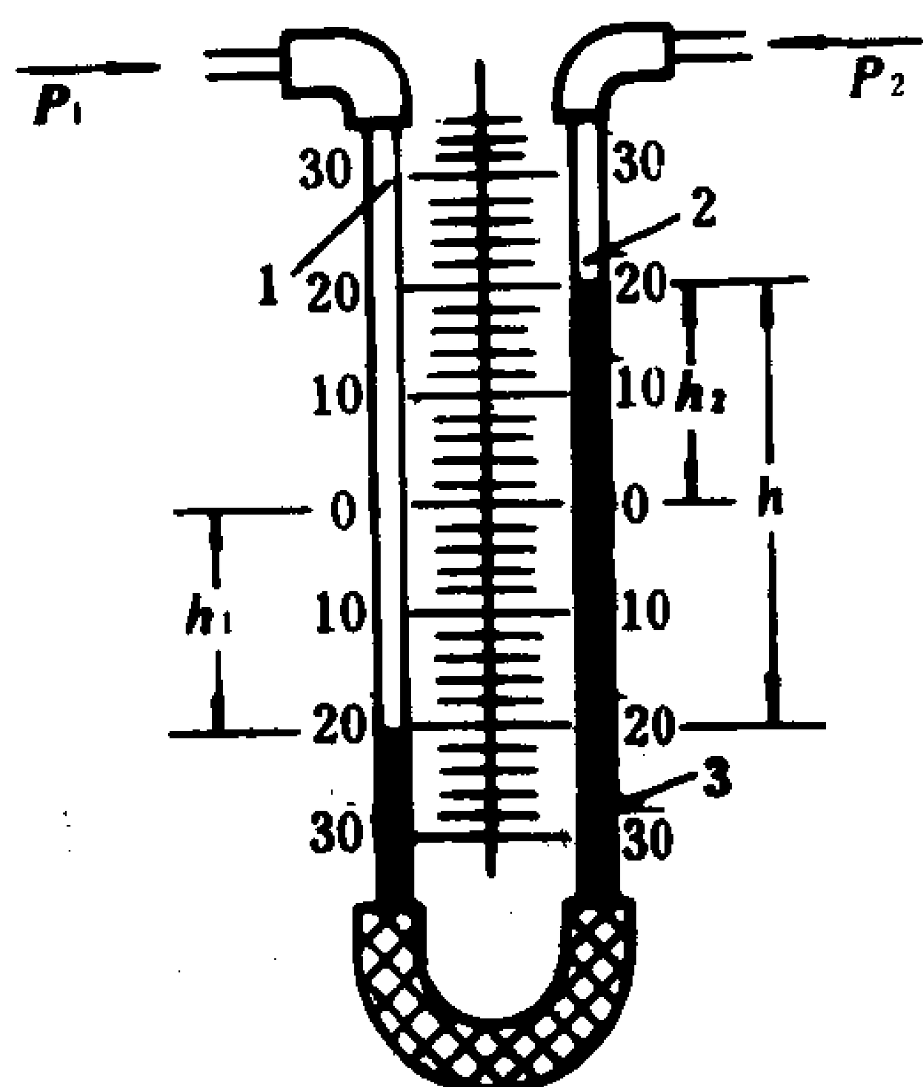


图 1.2.1-63 U形管液柱式压力计

1、2-肘管； 3-封液

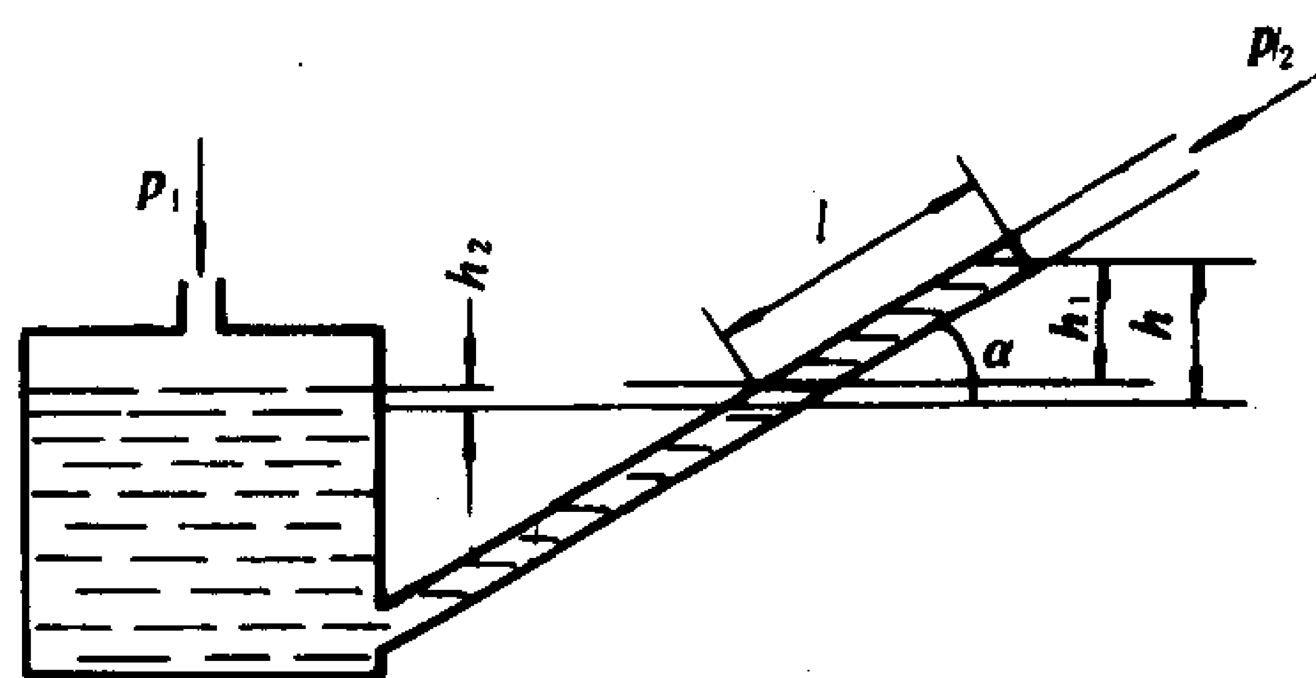


图 1.2.1-64 倾斜式微压计

入肘管。

3.2.2 弹性式压力计

这种压力计是利用表内弹性元件在压力作用下弹性变形来测量压力。图 1.2.1-65 为其结构示意图。它具有工作可靠，使用方便，测量范围广，读数直接，可以直接安装在测点附近，大大减少系统的时间滞后，特别适用在很容易溶解于工作液体中，或与工作液体产生反应的

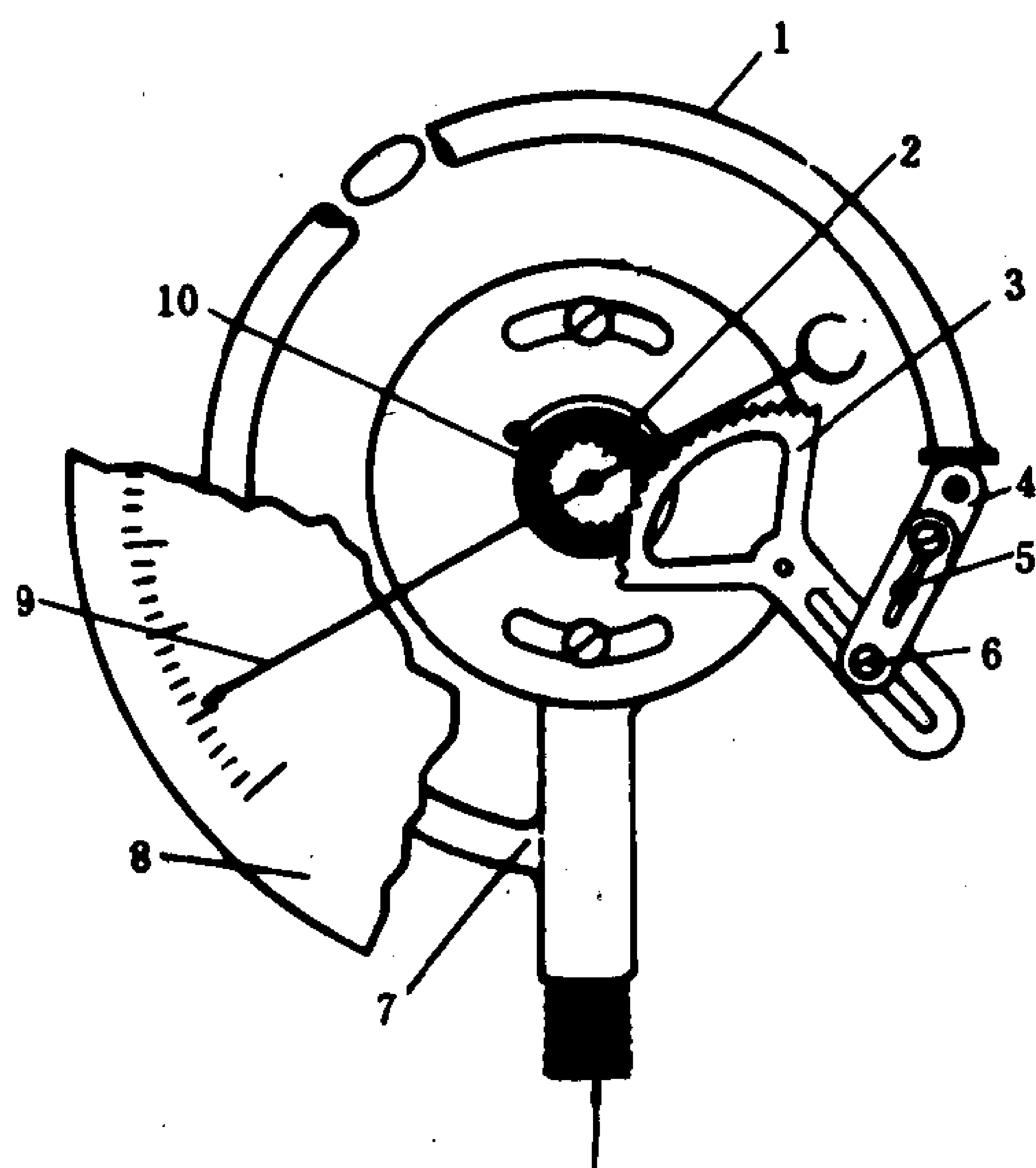


图 1.2.1-65 弹簧管压力计

1-弹簧管； 2-小齿轮； 3-扇形齿轮； 4-拉杆；
5-连杆调节螺钉； 6-放大调节螺钉； 7-接头；
8-刻度标尺； 9-指针； 10-游丝

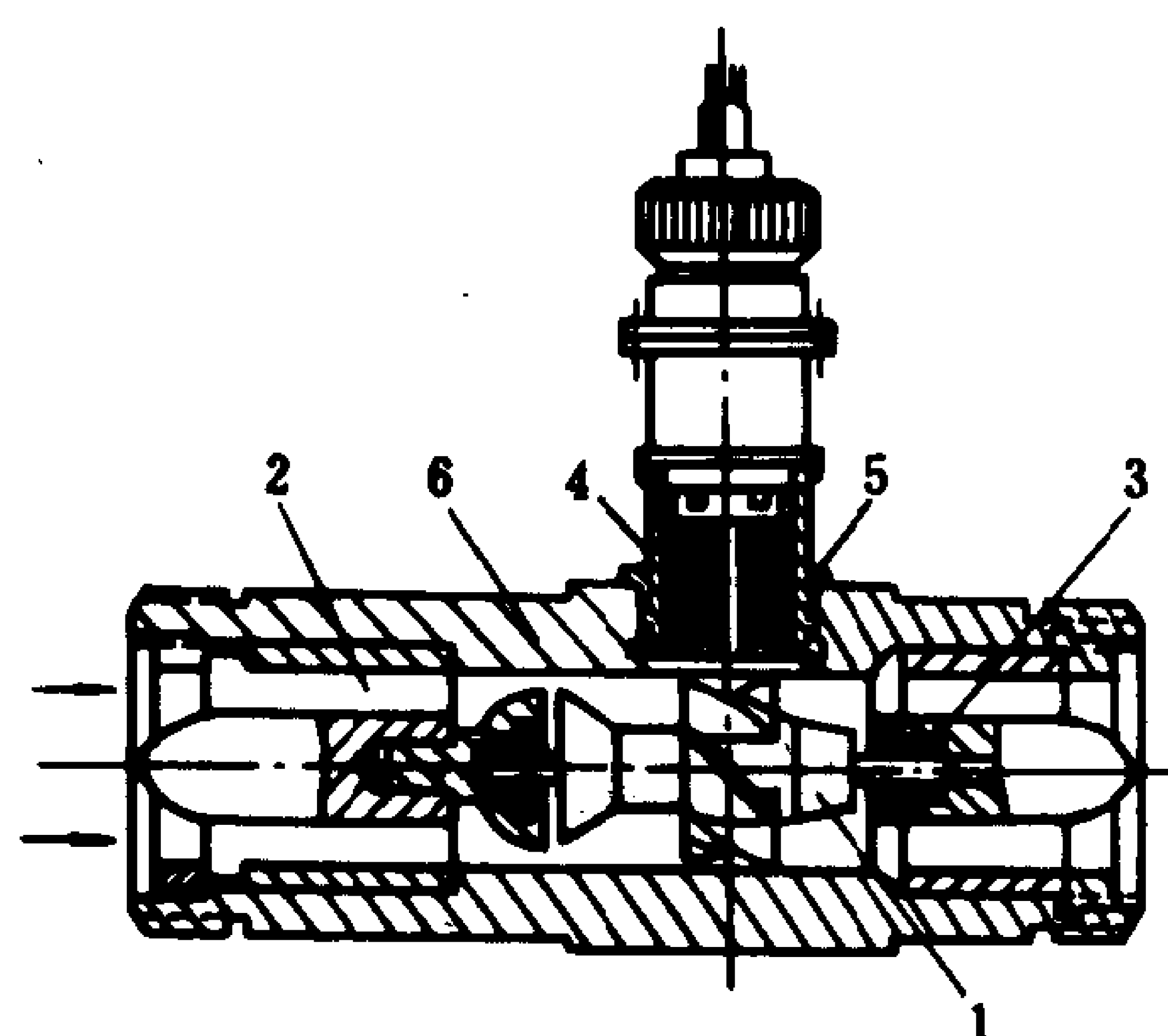


图 1.2.1-66 涡轮流量变送器

1-涡轮； 2-导液器； 3-轴承； 4-感应线圈；
5-永久磁铁； 6-壳体

气体，进行测量。这类压力计主要缺点是测量精度不太高，会产生弹性元件的弹性滞后，温度的影响、弹性元件弹性衰退等，需要定期检验。

3.3 流量测量仪表

轮机上常用的流量测量方法，大致可分为速度式和重量式两类，速度式流量测量方法中又以差压式使用最广泛。

3.3.1 速度式流量测量仪表

1)涡轮流量计结构，如图 1.2.1-66 所示，它是由涡轮、导流器、永久磁钢、感应线圈等组成，当被测流体通过时，冲击涡流轮叶后，使涡轮旋转，在一定的流量范围内，一定的流体粘度下，涡轮转速与流速成正比。当涡轮转动时，涡轮上由导磁不锈钢制成的螺旋形叶片轮流接近处于管壁上的检测线圈，周期性地改变检测线圈磁电回路的磁阻，使通过线圈的磁通量发生周期性变化，使检测线圈产生与流量成正比的脉冲信号，此信号经前置放大器放大后，可远距离传送至显示仪表。在显示仪表中，对输入脉冲进行整形，然后一方面对脉冲信号进行积算以显示总量，另一方面将脉冲信号转换为电流输出指示瞬时流量。

2)电磁流量计

这种流量计是基于磁感应原理，如图 1.2.1-67 所示，是其结构示意图，在工作管道的两侧有一对磁极，另有一对电极安装在磁力线和管道垂直的平面上，当导电流以平均速度$\overline{V}$流过直径为D的测量管段时切割磁力线，于是在电极上产生感应电势E，则电势：

$$E=C_1BD\overline{V} \tag{1.2.1-78}$$

式中：C_1——常数；

B——磁感应强度。

因为流过仪表的容积流量

$$q_V=\frac{1}{4}\pi D^2\overline{V} \tag{1.2.1-79}$$

合并以上两式，得

$$q_V=\frac{\pi}{4C_1}\times\frac{D}{B}E \tag{1.2.1-80}$$

或

$$E=4C_1\cdot\frac{B}{\pi D}q_V=kq_V \tag{1.2.1-81}$$

式中：K——电磁流量计的仪表常数

$$K=4C_1\frac{B}{\pi D}$$

当仪表口径D和磁感应强度B一定时，K为定值。感应电势与流体容积流量存在线性关系。

为了避免极化作用和接触电位差的影响，工业用电磁流量计通常采用交变磁场。其缺点是干扰较大。采用直流磁场对于真实地反映流量的急剧变化有利，故适用于实验室等特殊场合或用来测量不致于引起极化现象的非电介性液体。

电磁流量计的感受件结构，如图 1.2.1-68 所示。

3.3.2 差压式流量测量仪表

差压式测量方法是流量或流速测量方法中使用历史最久和应用最广泛的一种。它们的共同原理是根据伯努利方程测量流体流动过程中产生的差压来测量流量或流速。属于这种测量

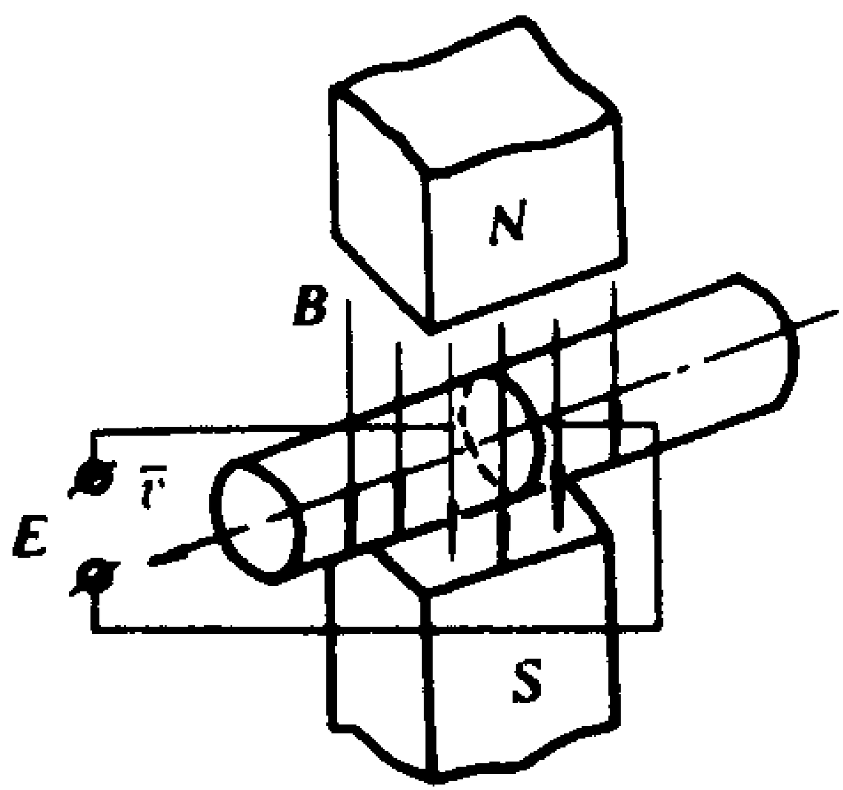


图 1.2.1-67　电磁流量计结构示意图

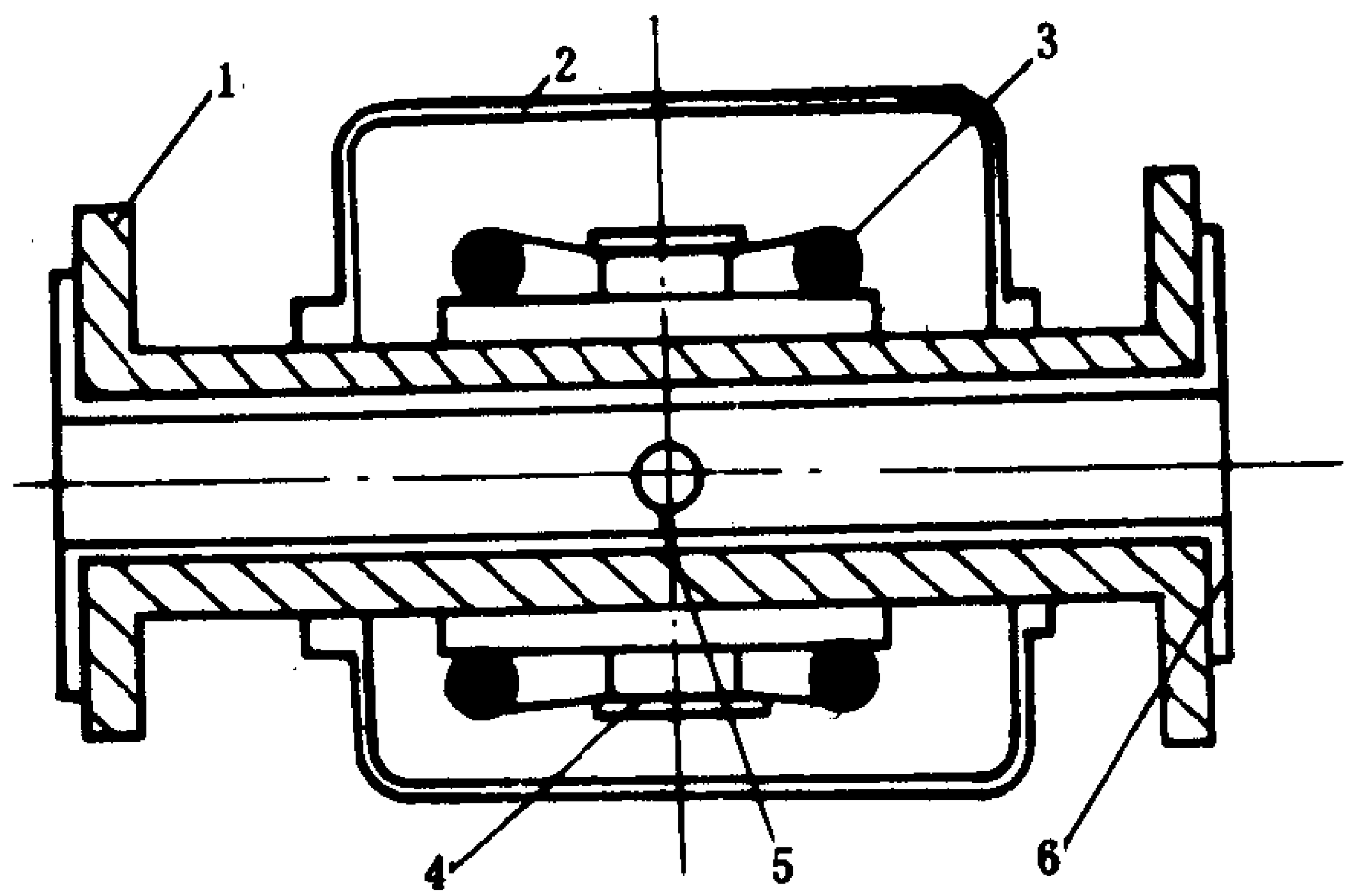


图 1.2.1-68　电磁流量计感受件结构示意图
1-导管和法兰；2-外壳；3-马鞍形激磁线圈；
4-磁轭；5-电极；6-内衬

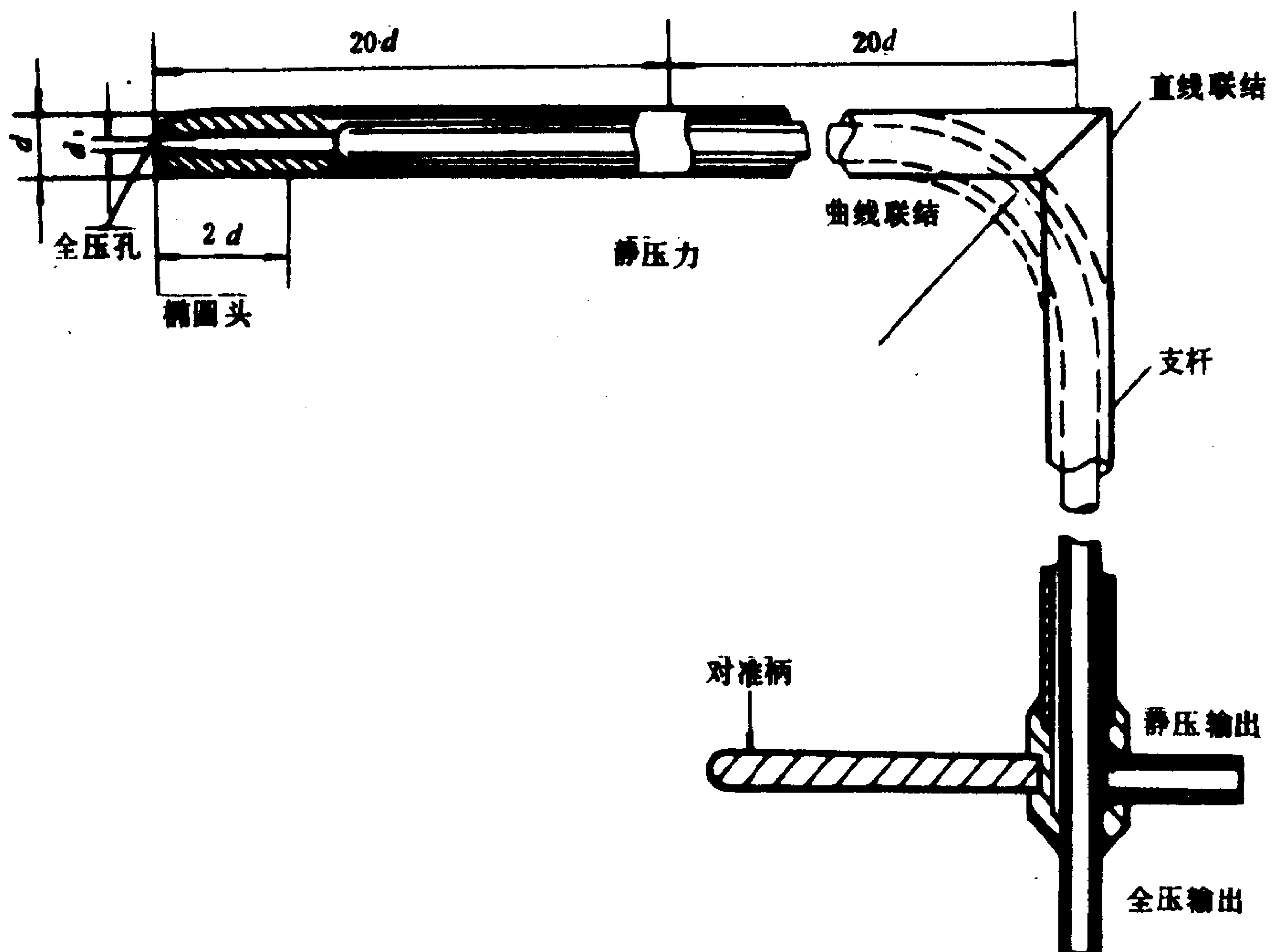


图 1.2.1-69　具有椭圆头部的标准毕托管

方法的流量计有如下几种

1)毕托管

毕托管是利用测量流体的全压和静压之差——动压Δp来测量流速，如图 1.2.1-69 所示，为具有椭圆头部的标准毕托管。

测量时，必须将毕托管牢固固定，并且必须使毕托管探头的轴线与管道中心线平行，这可用毕托管上附有的对准柄来对准。

2)转子流量计

转子流量计由一段垂直安装并向上渐扩的圆锥形管和在锥形管内随被测介质流量大小而作上下浮动的浮子组成。如图 1.2.1-70 所示，当被测介质流过浮子与管壁之间的环形流通面积时，由于节流作用在浮子上下产生差压Δp，此差压作用在浮子上产生使浮子向上的力，当

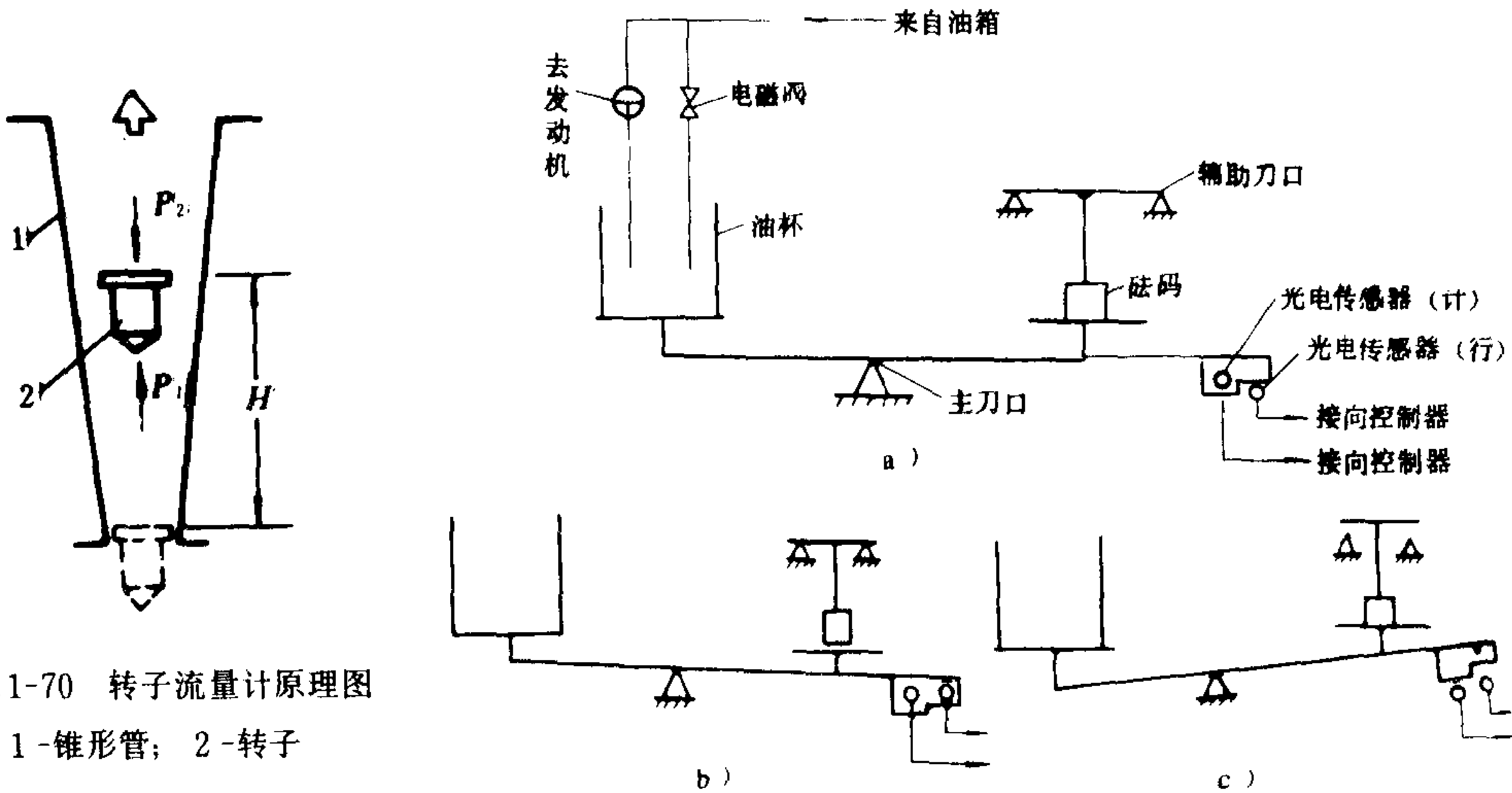


图 1.2.1-70 转子流量计原理图

1-锥形管；2-转子

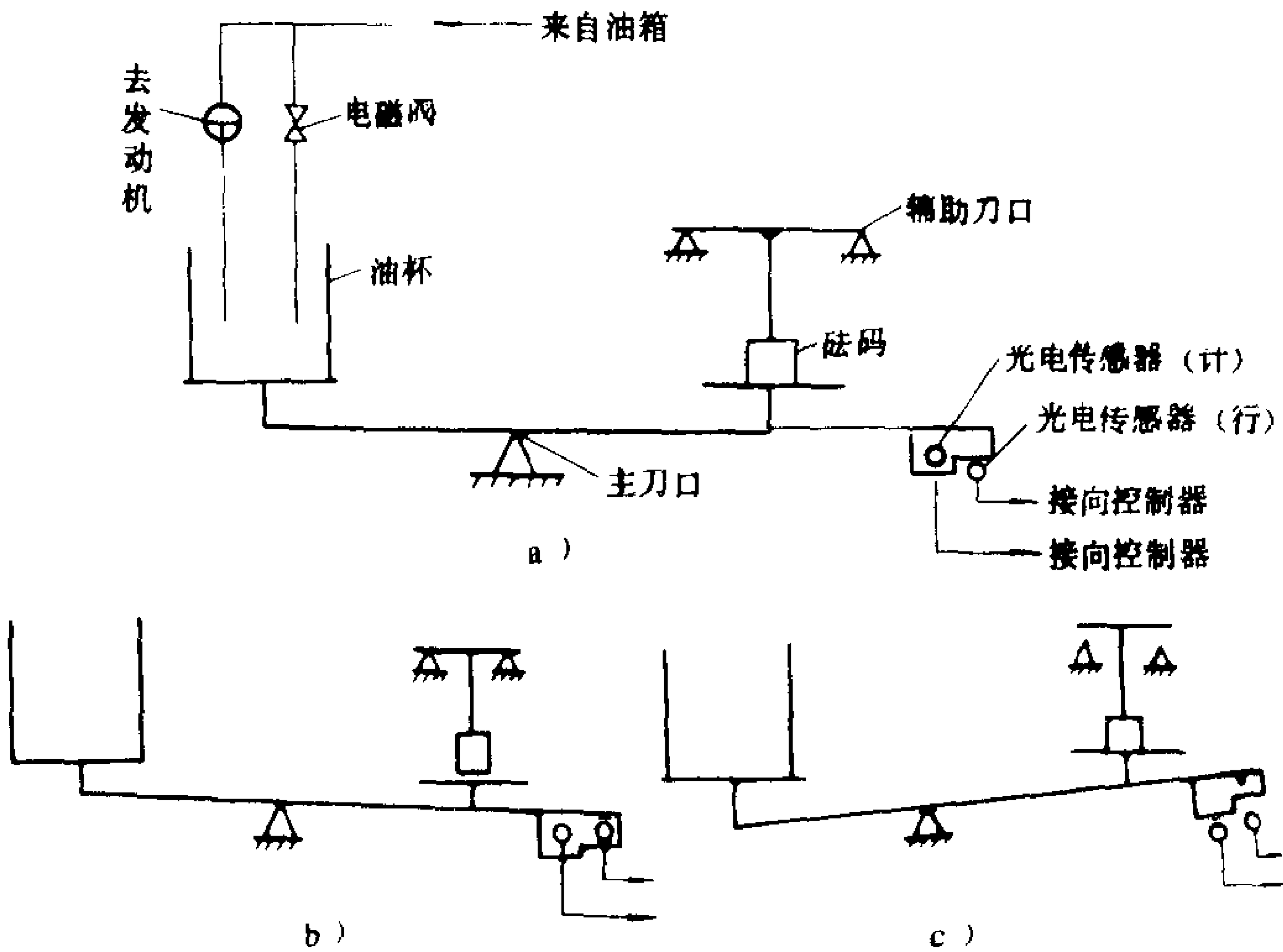


图 1.2.1-71 重量法自动测油耗示意图

此力与被测介质对浮子的浮力之和等于浮子重力时，浮子处于力平衡状态，浮子就稳定于锥形管的一定位置上。由于测量过程中浮子的重力和流体对浮子的浮力是不变，故在稳定的情况下，浮子受到的差压始终也是恒定的。当流量增大时，差压增加，使浮子上升，浮力与管壁之间环形通流面积增大，使差压减小，直至浮子上下的差压恢复到原来的数值、这时浮子平衡于较上部新的位置上，因此可用浮子在锥形管中的位置来指示流量。

3.3.3 重量或测量油耗的仪表

用重量法测油耗的基本原理是利用测量消耗一定重量G的燃油所花时间t，然后再用下式算出耗油率g_t

$$g_t=\frac{G\times 3600}{N_e\cdot t}\quad g/kW\cdot h \tag{1.2.1-82}$$

式中：G——消耗燃油重量，g；

t——经历时间间隔，s；

N_e——功率，kW。

目前，轮机中常用的转速油耗自动测量仪，其基本原理如图 1.2.1-71 所示，其测量装置示意图。

天平架在主刀口上，右边托盘上放着砝码，左盘放量油杯，天平右臂上装有挡光片，其两侧分别装有光源和光电传感器，挡光片用来控制两个光电传感器，由传感器再发出各种动作指令。

油杯无油时，天平倾向右侧，如图 1.2.1-71 b)所示，挡光片使两个光电传感器发出指令，使电磁阀门控制器打开，以便向油杯加油。随着油杯油量逐渐增多，天平渐趋平衡位置，天平的右边盘与砝码相接触，并使天平暂时停留在这一位置，但加油仍在继续，直至左端重量大于右端重量（包括砝码）时，法码重量方全部由辅助刀口转至左托盘上，天平随之倾向左边，如图 1.2.1-71 c) 所示，光电传感器受到光照并发出指令，使电磁阀关闭，加油停止。测量时，由于发动机逐渐消耗油杯中油量，天平则趋向于平衡位置，当刚到平衡位置时，砝码和辅助刀口刚好相接触，但重量仍全部由天平承担，由于此时挡光片挡住了光电传感器（计），则发出指令，使计数控制机构开始计数。直至燃油耗量等于砝码重量时，砝码重量则转移到辅助刀口上，继而使天平平衡破坏而倒向右测，如图 1.2.1-71 a) 所示，同时挡光片挡住光电传感器（停），并发出指令，使计数控制器停止计数，使电磁阀打开并向油杯充油。

我国生产的 SYZZ 转速油耗自动测量仪，是由转速传感器，自动燃油天平，控制显示器三部分组成。

1)转速传感器

当发动机转动时，转速传感器通过装在发动机轴上的 60 牙齿轮不断地切割传感器所产生的磁力线。因而在传感器线圈两端不断地产生脉冲信号，这些脉冲信号通过控制显示器用八段萤光数码显示出发动机的转速或消耗一定重量燃油时的总转数。

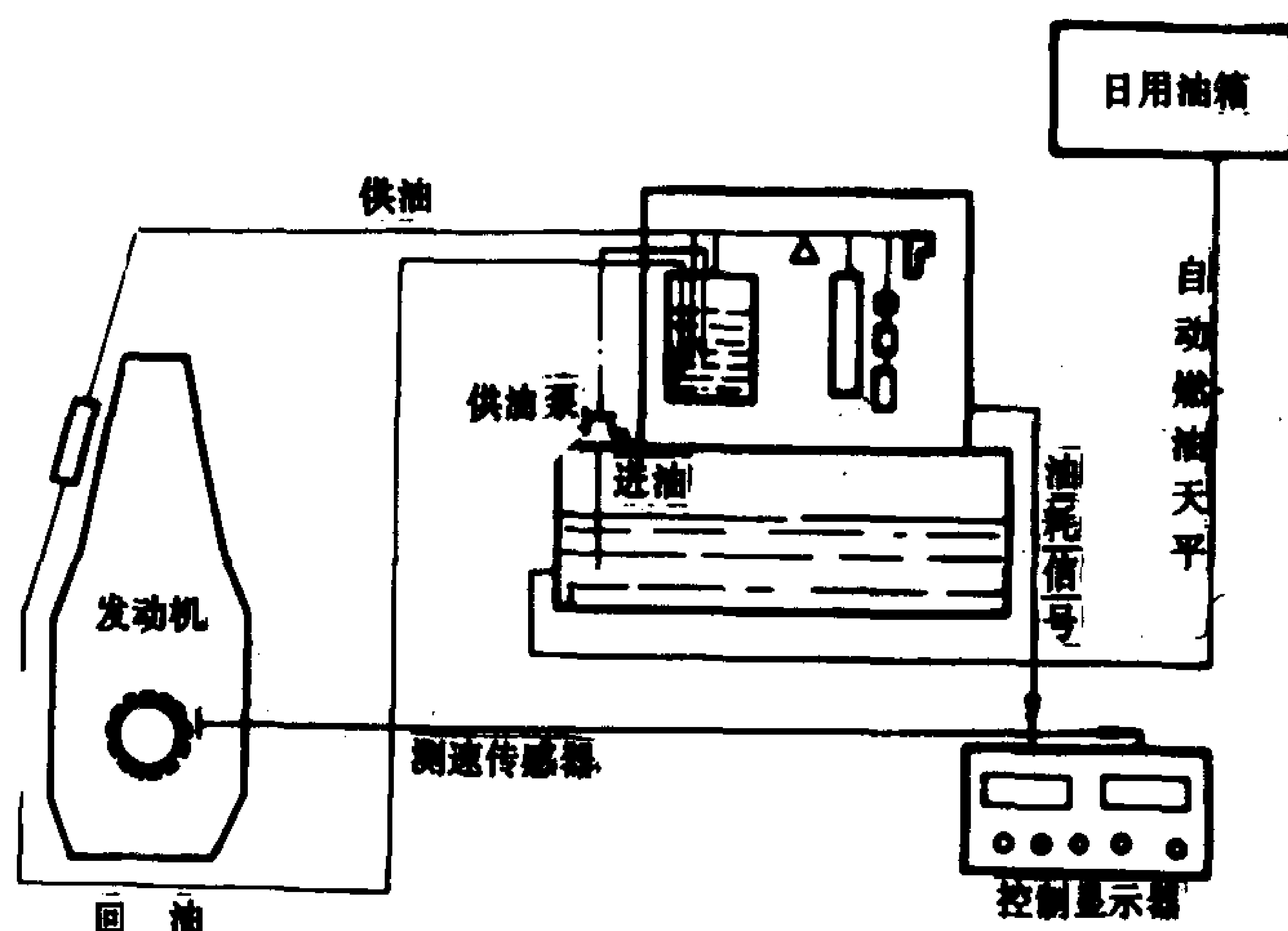


图 1.2.1-72 转速油耗自动测量仪

2)自动燃油天平

天平有 6 个称量砝码，测量范围为 100g到 2 kg。

3)控制显示器

该控制显示器系采用集成电路组装而成，该仪器具有抗干扰性、灵敏度高、精度较高等特点。

测量过程中，控制显示器能使整个测量过程按正常程序连续地重复工作，并不断地显示发动机在一定的工况下的转速，消耗一定重量燃油所用时间及在这段时间里发动机的总转速等数据，并不断地定时油杯供油，如图 1.2.1-72 所示。

3.4 气体流量测量仪表

内燃机试验中，常常需要测量某些气体流量，如进气流量、排气流量、增压器压气量、冷却风扇流量等。其中最重要是测定吸入发动机的空气量。测量柴油机所使用的空气流量计及其性能，见表 1.2.1-6。

表 1.2.1-6 柴油机用空气流量计分类及性能

型式	名称	工作原理	主要特点	精度	量程比
节流差压式	标准节流装置	节流差压	结构简单、寿命长、适应性广，适于高温高压，不需单个标定，安装加工要求严格，压力损失大，量程小，所需直管段长	1~2	3 : 1
	双纽线节流器	节流差压	结构简单，制造加工容易，节流损失小，适应性广，不需直管段，适于增压柴油机空气流量测量，需单个标定		
测频式	旋进旋涡流量计	气流的进动频率与流速成正比	量程大，通用性大，结构简单，无可动部件，不受气流状态和成分影响，压力损失小，成本高	1	30 : 1
	涡街流量计	卡门涡街的旋涡频率与流速成正比	压力损失小，通用性大；量程大，不受气流状态和成分影响	1	30 : 1
测速式	动压管	流体动能变压力能由动压力测知该速	结构简单、压力损失小，适于高速气流，价低，对涡流敏感，低速时误差大，适于实验室用		
	激光测速仪	光学多普勒效应	对气流无干扰，测量范围大，线性好，分辨率高，设备复杂		
层流差压	层流流量计	层流流动的脉动气体其流量与压差Δp成正比，即$Q=K_p\cdot\Delta p$	使用简单、方便、不需改变原进气系统，不需设稳压箱，压力损失小，量程大，造价高，需单个标定，应用不广		

按照 GB6302—86规定，船用柴油机空气流量测定，应使用标准节流装置、层流流量计、旋涡流量计。一般情况下，多使用标准节流装置和双纽线节流器。测量仪表精确度应为±3%。

3.4.1 标准节流装置

1)装置组成

标准节流装置由标准节流元件、取压装置和测量管道组成。空气流经管道内的节流元件时，流束局部收缩、流速提高、压力降低．在节流元件前后形成压差Δp，根据流体力学，流体的流量$Q=K\cdot\sqrt{\Delta p}$。故此法亦称节流差压法。在完全符合国家规定的设计、安装和使用规程的各项条件时，其流量与压差之间不必单个校准，可直接用计算法确定流量。这种节流

元件称标准节流件，其成套的一次装置称标准节流装置。如图 1.2.1-73 所示。

按照我国标准，使用标准节流装置时，应满足下述条件：

流束为连续流动，在节流件前流束与管轴线平行。

流体为牛顿流体，即为单相均匀流体。

不适于脉冲流和临界流的流量测量。

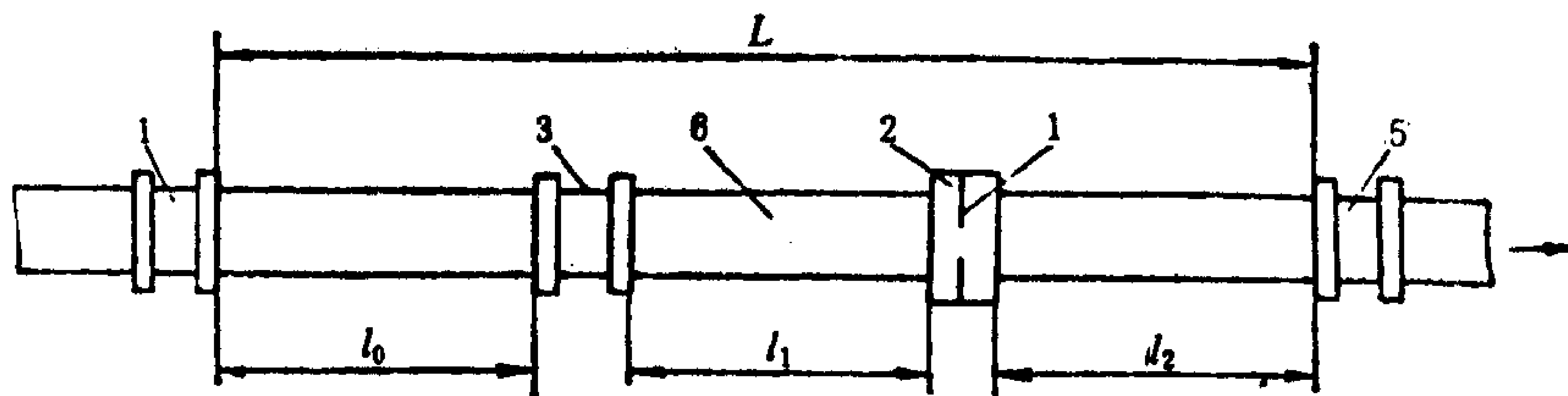


图 1.2.1-73 标准节流装置

1-节流元件；2-取压装置；3、4-上游段第一个、第二个阻流件；5-下游段第一个阻流件；6-直管段；L_0、L_1、L_2-定长直管段

(2)流量基本方程

根据流体的一元流动方程和流束的连续流动方程可推导出流量基本方程为：

体积流量 $Q=\alpha\cdot\varepsilon\cdot A_0\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\Delta p}$ m^3/s (1.2.1-83)

质量流量 $M=\alpha\cdot\varepsilon\cdot A_0\cdot\sqrt{2\rho\cdot\Delta p}$ kg/s (1.2.1-84)

重量流量 $G=\alpha\cdot\varepsilon_0\cdot A_0\cdot\sqrt{2g\rho\cdot\Delta p}$ N/s (1.2.1-85)

目前，使用最广泛的是质量流量的实用形式：

$M=0.01252\cdot\alpha\cdot\varepsilon\cdot d^2\sqrt{\rho\cdot\Delta p}$ kg/h (1.2.1-86)

国际标准 ISO5167 给出的流量方程的实用形式为：

$M=0.01252C\cdot E\cdot\varepsilon\cdot d^2\cdot\sqrt{\rho\cdot\Delta p}$ kg/h (1.2.1-87)

$Q=0.01252C\cdot E\cdot\varepsilon\cdot d^2\cdot\sqrt{\Delta p/\rho}$ m^3/h (1.2.1-88)

式中：A_0——标准节流件开口面积，m^2；

ρ——标准节流件前空气密度，kg/m^3；

r——标准节流件前空气重度，N/m^3；

Δp——标准节流件前后压差，mm H_2O；

α——流量系数；

d——节流件孔径，m；

ε——膨胀系数；

C——流出系数；

E——渐近系数。$E=(1-\beta^4)^{-\frac{1}{2}}$，

$\beta=\frac{d}{D}$（直径比），D——管径。

（1）流量系数α

实验指出，α与流体性质、取压方式、直径比β、流束分布、入口流速、管道粗糙度等因素有关。国标给出了角接取压标准孔板节流元件的光滑管流量系数$\alpha_0=f(\beta、Re_D、\alpha_0\beta^2)$的函数表。根据已知$\beta$和雷诺数$Re_D$查表可得出$\alpha_0$，再通过对管道粗糙度进行修正（查表），可求出实际管道的α。

（2）膨胀系数ε

ε是考虑可压缩流体在节流件后体积膨胀的修正系数。对角接取压可用经验公式1.2.1-89求得ε（实用中可查表）：

$$\varepsilon=1-(0.3707+0.3184\beta^4)\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/k}\right]^{0.935} \tag{1.2.1-89}$$

式中：　K——气体的绝热指数；

p_2/p_1——节流元件后压力与节流件前压力之比。

（3）压力损失δ_p

压力损失是由流束在节流件后的旋涡损失产生的。此项压力损失可用经验公式1.2.1-90求得：

$$\delta_p=\frac{1-\alpha\beta^2}{1+\alpha\beta^2}\cdot\Delta p \tag{1.2.1-90}$$

要求计算得到的压力损失δ_p值不得超过允许值。

3）标准节流元件

标准节流元件有孔板、喷嘴、文丘利喷嘴和文丘利管等4种。文丘利喷嘴和文丘利管结构复杂、造价较贵，因而在柴油机空气流量测量中，多使用标准孔板和标准喷嘴。它们之间的性能比较见表1.2.1-7。这几种节流元件的理论和基本方程均相同，仅试验系数不同。如图1.2.1-74所示，为我国的标准孔板轮廓尺寸和加工要求。图中箭头方向为流束流向。

表1.2.1-7　**标准节流元件性能比较**

比较项目		标准孔板		标准喷嘴	标准文丘利管
		角接取压	法兰取压	角接取压	
适用范围	管道直径mm	50～1000	50～750	50～500	150～400
	直径比β	0.22～0.80	0.10～0.75	0.32～0.80	
	雷诺数Re_D	$5\times10^3\sim10^7$	$8\times10^3\sim10^7$	$2\times10^4\sim2\times10^6$	
	流量m^3/h	1.6～100000		50～26000	240～1800
压力损失		较大		小	最小
工作参数	压力10^2kPa	200		200	25
	温度℃	500		500	500
测量精度		高		较高	最高
造价		最低		低	高
所需直管段		长		短	最短

4）取压装置

按GB2624—81规定，标准节流元件的取压装置，可采用角接取压和法兰取压两种方法。前者又分环室取压和单独钻孔取压。如图1.2.1-75 a）所示，系角接取压，b）系法兰取压。

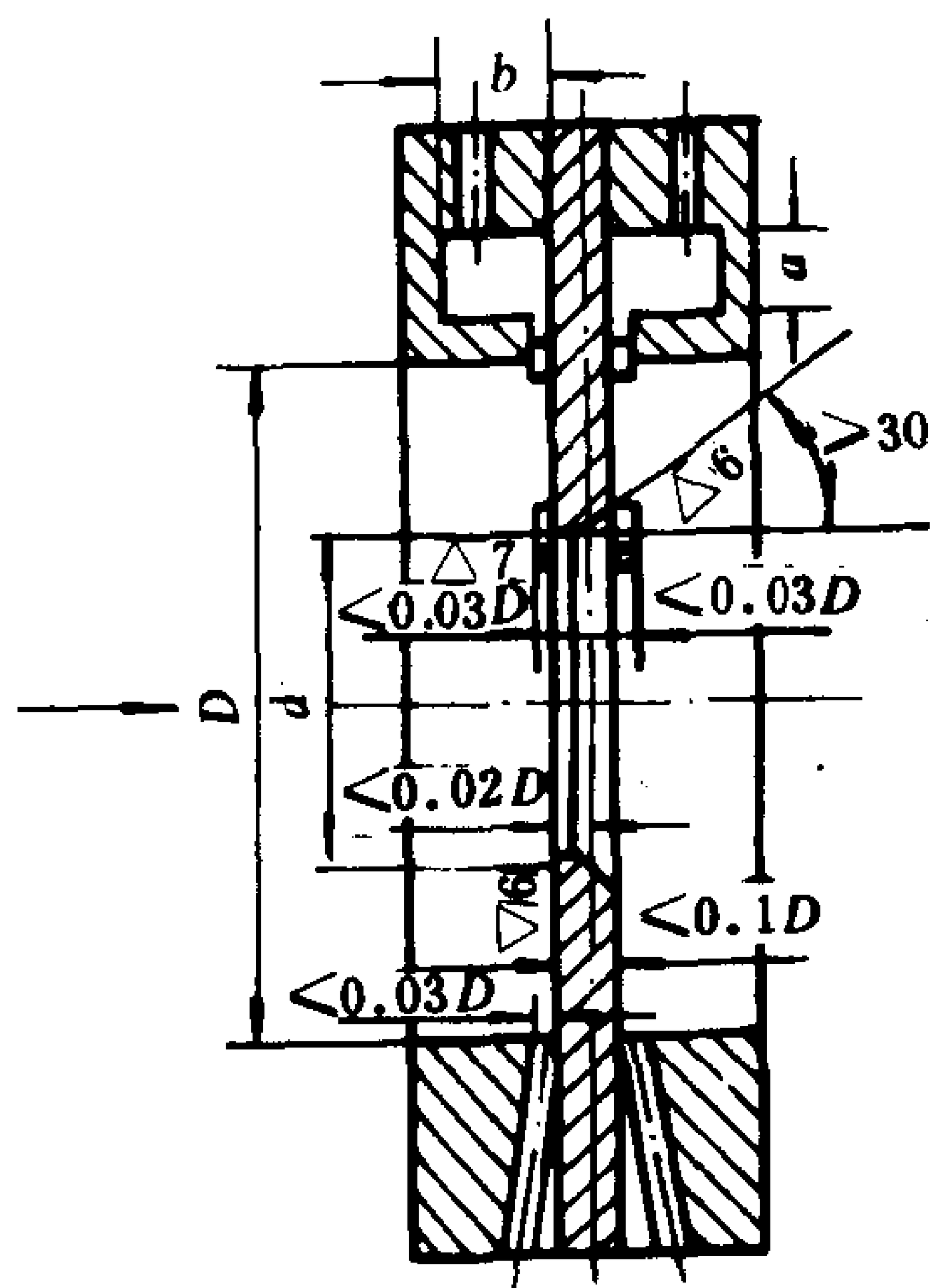


图 1.2.1-74 标准孔板

当$\beta \leq 0.67$时d的公差是$\pm 0.01d$，

当$\beta > 0.67$时d的公差是$\pm 0.0005d$

上部分：环室取压；下部分：单独钻孔取压。

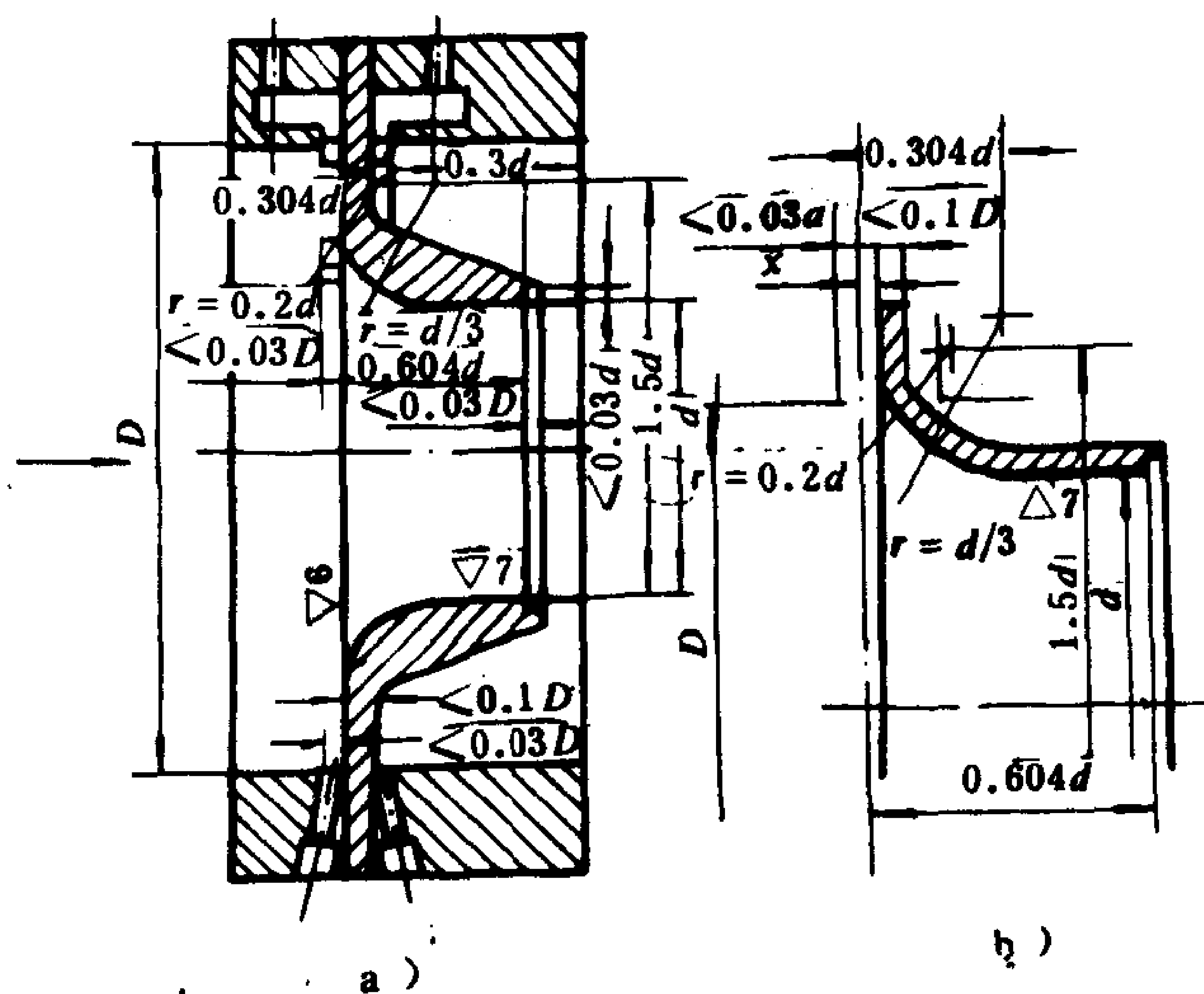


图 1.2.1-75 标准取压装置

a)角接取压；b)法兰取压

图上部为环室取压：$B \leq 0.65$，$0.005D \leq a \leq 0.03D$

$B > 0.65$，$0.01D \leq a \leq 0.02D$

图下部为单独钻孔取压：$B \leq 0.65$，$0.005D \leq a \leq 0.03D$

$B > 0.65$，$0.01D \leq a \leq 0.02D$

通常多采用角接取压。

5)测量管

按国标规定，在标准节流元件前、后必须有足够长的直管段长L_1、L_2。此L_1、L_2与节流件前阻流件形式、直径比d/D有关。见表 1.2.1-8。

3.4.2 双纽线节流器

双纽线节流器是一种非标准节流装置。它特别适于测量增压柴油机空气消耗量。在双纽线节流器前，应不按装任何管道。

1)结构

双纽线节流器进口段轮廓线为双纽线，出口段为圆柱形直管。如图 1.2.1-76 所示。双纽线的极坐标方程为：

$r^2 = a^2 \cdot \cos 2\theta$，并满足$a = (0.6 \sim 0.8)\ D$，$\theta = 0 \sim 45°$，$\theta_{max} = 45°$

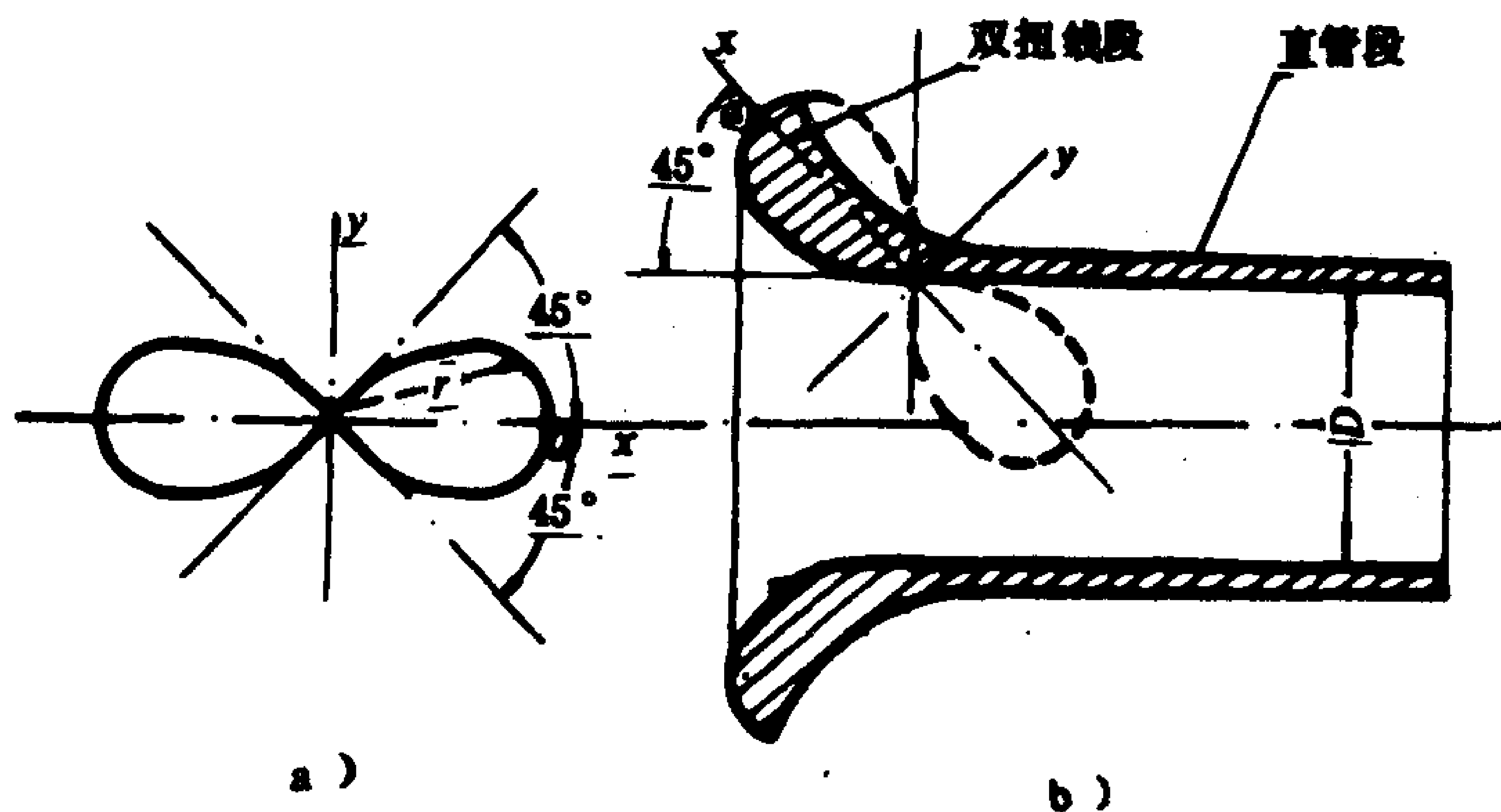


图 1.2.1-76 双纽线节流器

表 1.2.1-8　　　　　　　　　　　　**节流装置上下游侧的最小直管段长度**

节流直径比 B (d/D)	节流装置上游侧局部阻力件形式和最小直管段长度L_1						下游侧最小直管段长 L_2(所有左列阻流件)
	一个 90°弯头或只有一个支管流动的三通	在同一平面内有多个 90°弯头	空间弯头（在不同平面内有多个90°弯头）	异径管（大变小 $2D\to D$, 长度≥$3D$；小变大 $\frac{1}{2}D\to D$长度≥$1\frac{1}{2}D$）	全开截止阀	全开闸阀	
≤0.02	10(6)	14(7)	34(17)	16(8)	18(9)	12(6)	4 2
0.25	10(6)	14(7)	34(17)	16(8)	18(9)	12(6)	4 2
0.30	10(6)	16(8)	34(17)	16(8)	18(9)	12(6)	5(2.5)
0.35	12(6)	16(8)	36(18)	16(8)	18(9)	12(6)	5(2.5)
0.40	14(7)	18(9)	36(18)	16(8)	20(10)	12(6)	6(3)
0.45	14(7)	18(9)	38(19)	18(9)	20(10)	12(6)	6(3)
0.50	14(7)	20(10)	40(20)	20(10)	22(11)	12(6)	6(3)
0.55	16(8)	22(11)	44(22)	20(10)	24(12)	14(7)	6(3)
0.60	18(9)	26(13)	48(24)	22(11)	26(13)	14(7)	7(3.5)
0.65	22(11)	32(16)	54(27)	24(12)	28(14)	16 (8)	7(3.5)
0.70	28(14)	36(18)	62(31)	26(13)	32(16)	20(10)	7(3.5)
0.75	36(18)	42(21)	70(35)	28(14)	36(18)	24(12)	8(4)
0.80	46(23)	50(25)	80(40)	30(15)	44(22)	30(15)	8(4)

其它阻力件形式	装置上游侧最小直管段长
节流直径比 0.5 以上的急收缩管	30 (15)
直径在 $0.03D$以下的温度计保护管	5 (3)
直径在 $0.03D\sim0.13D$的温度计保护管	20 (10)

注：直管段长度L_1、L_2是D的倍数；
括号内数值是附加±0.5%误差的管长
d——节流装置内径，D——管道内径，
■——节流装置。

为加工方便，进口段双纽线可采用数段圆弧代替，并应使线型误差小于 0.1 mm。圆柱段直径D加工误差应不大于$\pm0.001D$，边缘应光滑无毛刺。取压孔均布 4 ~6 个，孔径$d_1\le 0.03D$，且满足$2\text{mm}\le d_1\le 12\text{mm}$。

2)流量基本方程

$$质量流量M=\frac{\pi}{4}D^2\sqrt{\frac{1}{1+\xi}}\cdot\sqrt{2\rho\cdot\Delta p}\quad \text{kg/s}\qquad(1.2.1\text{-}91)$$

式中：ξ——阻力系数，$\xi=0.02\sim0.04$；
D——通流直径，即圆柱段直径，m；
Δp——压力差，Pa；
ρ——空气密度，kg/m^3。

3.4.3　柴油机空气流量测量系统和误差分析

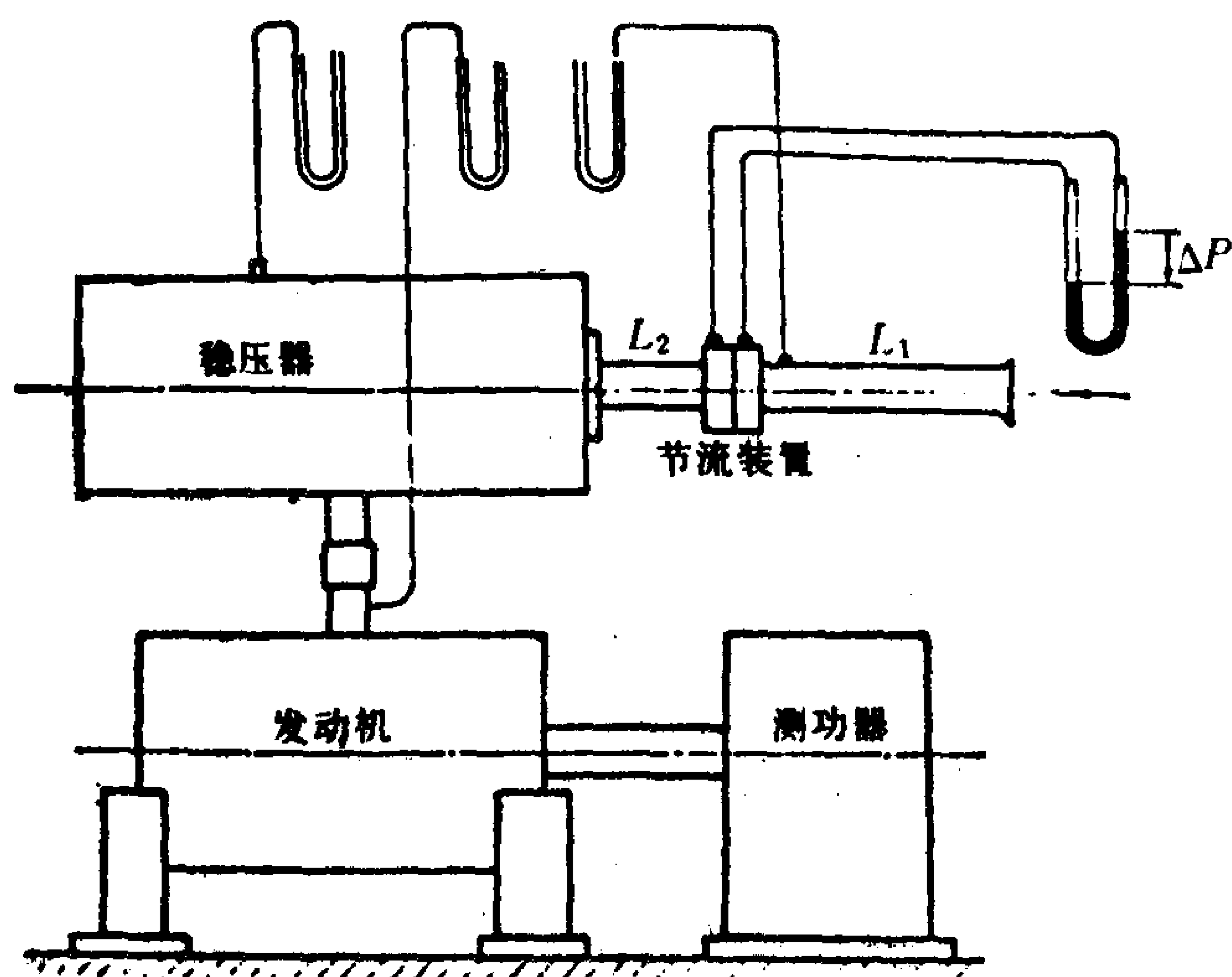


图1.2.1-77 柴油机空气流量测量系统

1)测量系统

(1)柴油机进、排气是非定常流动，在测量系统中，必须增设稳压箱，如图1.2.1-77所示。稳压箱容积取被测柴油机单缸容积的200倍(低速机取300倍)。在稳压箱一端装皮膜，以抑制气流的脉冲。

(2)节流装置的开孔必须与管道轴线同心，其最大偏心度不得超过$0.015D(\frac{D}{d}-1)$。节流元件的端面应与管道轴线垂直，其不垂直度不大于±1°。

(3)在距节流装置两端面2D的管道内表面上，不应有任何突出物和肉眼可见的粗糙不平现象。

(4)节流装置前后须有一定长度的直管段L_1、L_2，见表1.2.1-8。

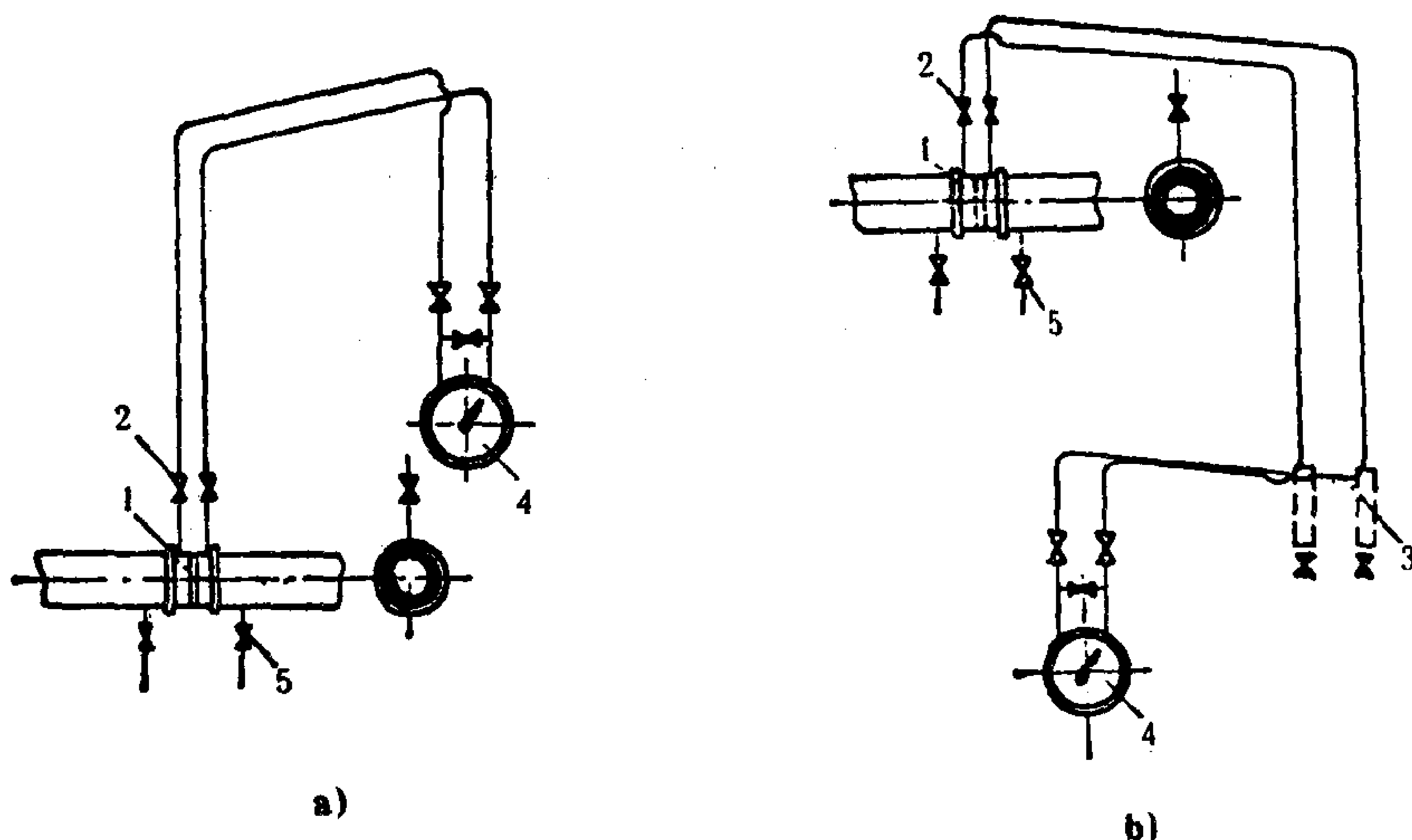


图1.2.1-78 差压计与节流装置的相对位置

1-节流装置；2-阀门；3-沉降器；4-差压计；5-吹洗阀

(5)差压计应安装在节流装置的上方，如图1.2.1-78 a)所示。如装在下方时，应在信号连接管的最低点加装沉降器，以排出冷凝液，如图1.2.1-78 b)所示。差压信号连接管应为金属管，内径8～10 mm，总长小于50m，大于3 m，应垂直安装。如需倾斜安装，其与

水平面倾斜度不小于 1：10，差压计的精度等级应高于 1 级精度。

3.5 温度测量仪表

3.5.1 常用温度计的选择：见表 1.2.1-9、表 1.2.1-10。

表 1.2.1-9　　常用温度计的选用[1,2,6]

温度计类别	测温范围（℃）	特　点	应用示例	备　注
玻璃水银温度计	−100～+600	易碎、不耐震、就地读数	水温、油温、空气温度	电接点式可以控温、报警
双金属温度计	−60～+500	耐冲击震动、就地读数	水温、油温	
压力式温度计	−80～+550	耐冲击震动、可以远传集中检测	水温、油温	电接点式可以控温、报警
热电偶温度计	0～+1800	耐冲击震动、可以远传集中检测	排气温度、零件温度等	可以巡检、控温、报警、自动显示、打字记录等
热电阻温度计	−200～+500	耐冲击震动、可以远传集中检测	水温、油温、空气及排气温度	可以巡检、控温、报警、自动显示、打字记录等
半导体电阻温度计	0～500	可以远传、快速测量	水温、油温、零件表面点温	
红外线辐射温度计	0～1000（或更高）	非接触快速测量	暴露的表面温度	

表 1.2.1-10　　常　用　热　电　偶[6]

热电偶类别	分度号	正负极识别		测温上限（℃）		热电势允许偏差（式中 t 为实测温度）	
		正极	负极	长时间	短时间		
镍铬-镍硅	EU-2	无磁性	有磁性	1000	1300	0～+400℃	大于 400℃
						±4℃	±0.75%t
镍铬-考铜	EA-2	色较暗	银灰色	600	800	0～+400℃	大于 400℃
						±4℃	±1%t
铂铑$_{10}$-铂	LB-3	较　硬	较　软	1300	1600	0～+600℃	大于 600℃
						±2.4℃	±0.4%t
铂铑$_{30}$-铂铑$_{6}$	LL-2			1600	1800	0～+600℃	大于 600℃
						±3℃	±0.5%t

柴油机试验中，一般均采用具有保护套管的工业用热电偶和铠装热电偶。在选用时，通常应该根据测温范围。首先选择类型，然后再根据安装使用情况选择保护管的结构尺寸和插入深度等。

3.5.2 压力式温度计

图 1.2.1-79 为压力式温度计，是根据在封闭容器中的液体，气体或低沸点液体的饱和蒸

气，受热后体积膨胀或压力变化这一原理制成的。

在使用压力式温度计时，应注意保护毛细管，切勿使其受到损坏，以保持密封性能良好。

3.5.3 热电偶温度计

工程中常用热电偶温度计作为热电偶的显示仪表，如图 1.2.1-80 所示，是其原理示意图。图中的动线圈，被置于永久磁铁形成的磁场中，便有电流流过动圈导线。根据电磁感应定律，当动线圈中有电流流过时，将会受到永久磁铁磁场的作用，就会有力作用在线圈上。其结果是使线圈绕其纵轴转动。因而，连在线圈上的指针就转动。

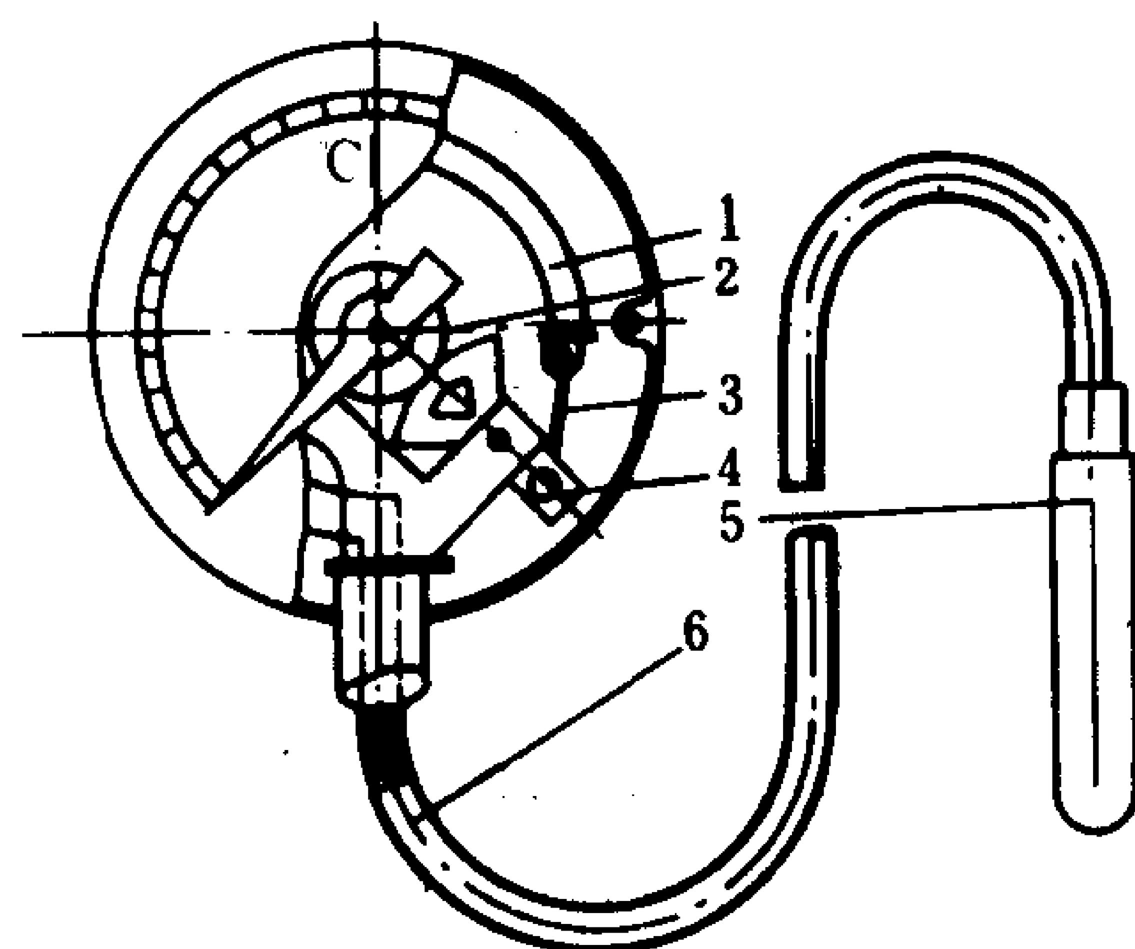


图 1.2.1-79 压力式温度计

1-弹簧管；2-小齿轮；3-连接杆；4-扇形齿轮；5-感温包；6-毛细管

这种温度计虽然精度不高（一般 1.0 级）但构造简单，价格低廉，不需要复杂的维护工作。所以被广泛使用。

在使用热电偶温度计时，应注意：

（1）配套使用的热电偶分度号应与温度计表盘上所注明的分度号一致。

（2）测量电路的总电阻（包括热电偶电阻、引延导线电阻在内）应等于表盘上所注明的恒定值（通常 5 Ω或 15 Ω）。

（3）环境温度为 20℃

因此，在使用测温计时，只有满足以上要求，才能保证热电偶温度计表盘上所注明的测量精度。

3.5.4 辐射式温度计

这种测温计是利用热接收器接收被测物体在不同温度下辐射能量的不同来确定对象的温度。目前用的较多有比色高温计、光学高温计、辐射高温计等。它们的特点是不需要与被测对象接触。因此，可以测定转动物体的温度，同时具有响应快，易于实现遥控，自动检测等优点。但精度不高，结构较复杂。

1）比色高温计

比色高温计是根据热辐射原理制作的。当温度变化时，物体的最大辐射强度向波长λ增加或减小方向移动。便在λ_1和λ_2下亮度比发生变化。测量亮度比的变化即可测得相应的温度。目前，我国生产的有WDS-Ⅱ型光电比色高温计。

2）光学高温计

光学高温计是利用受热物体的单色辐射强度随温度升高而增加的原理来进行高温测量的。目前，我国生产的有WGG-2型光学高温计。

光学高温计的测量范围下限一般不低于 800℃。因为温度太低，物体光亮太弱。

3.6 动态测量记录仪表

内燃机在试验中，为了显示和记录各种试验的动态信号，如示功图的测录，振动测量器等，为进行数据的分析研究提供原始资料，故需要与动态信号相应的记录仪器。目前应用最广泛的是光线示波器，其次是磁带记录仪。

3.6.1 光线示波器

光线示波器实质上就是一种磁电式电流计。其原理如图 1.2.1-81 所示。图的右部为振动

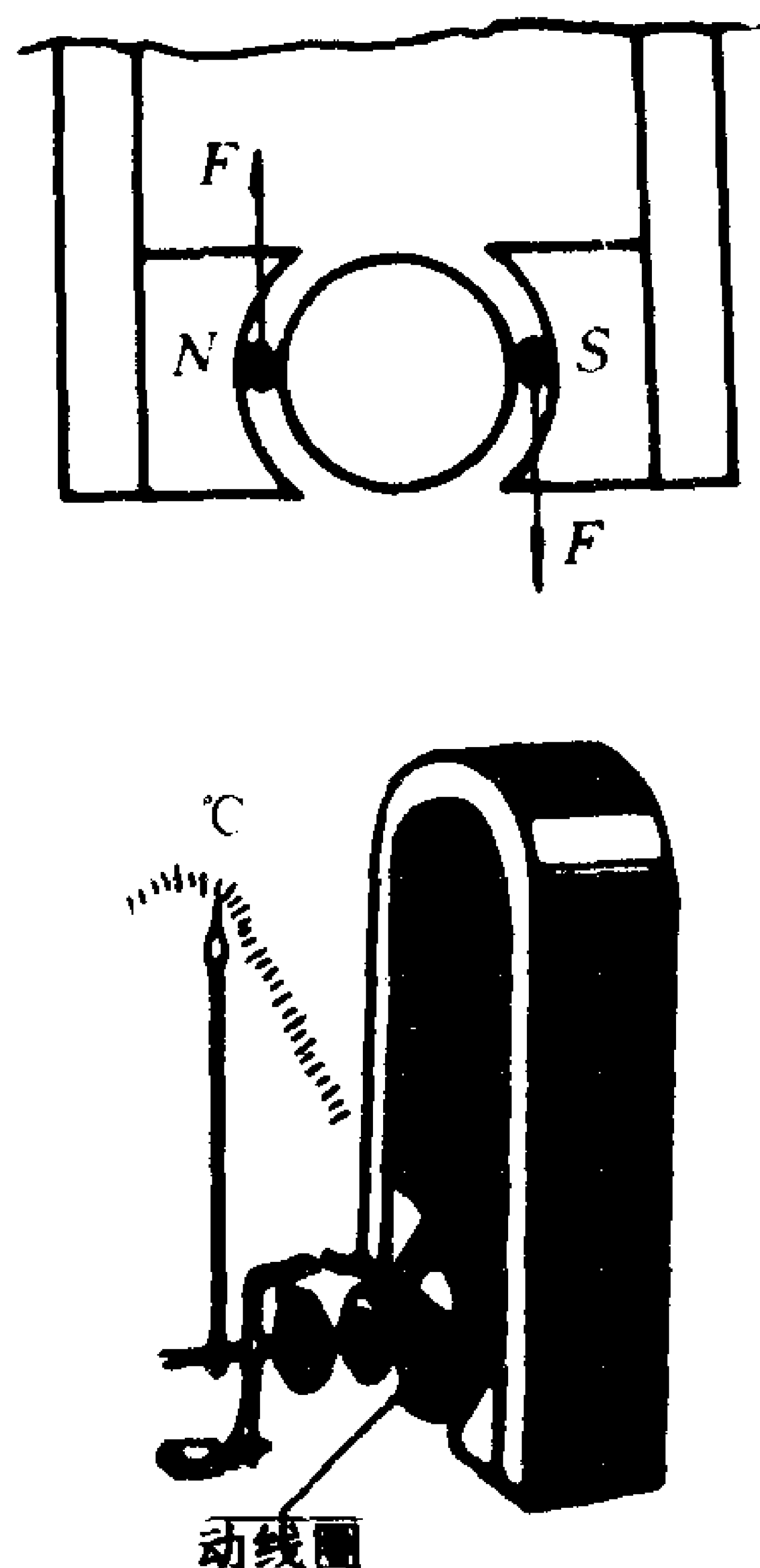


图 1.2.1-80　测温毫伏计

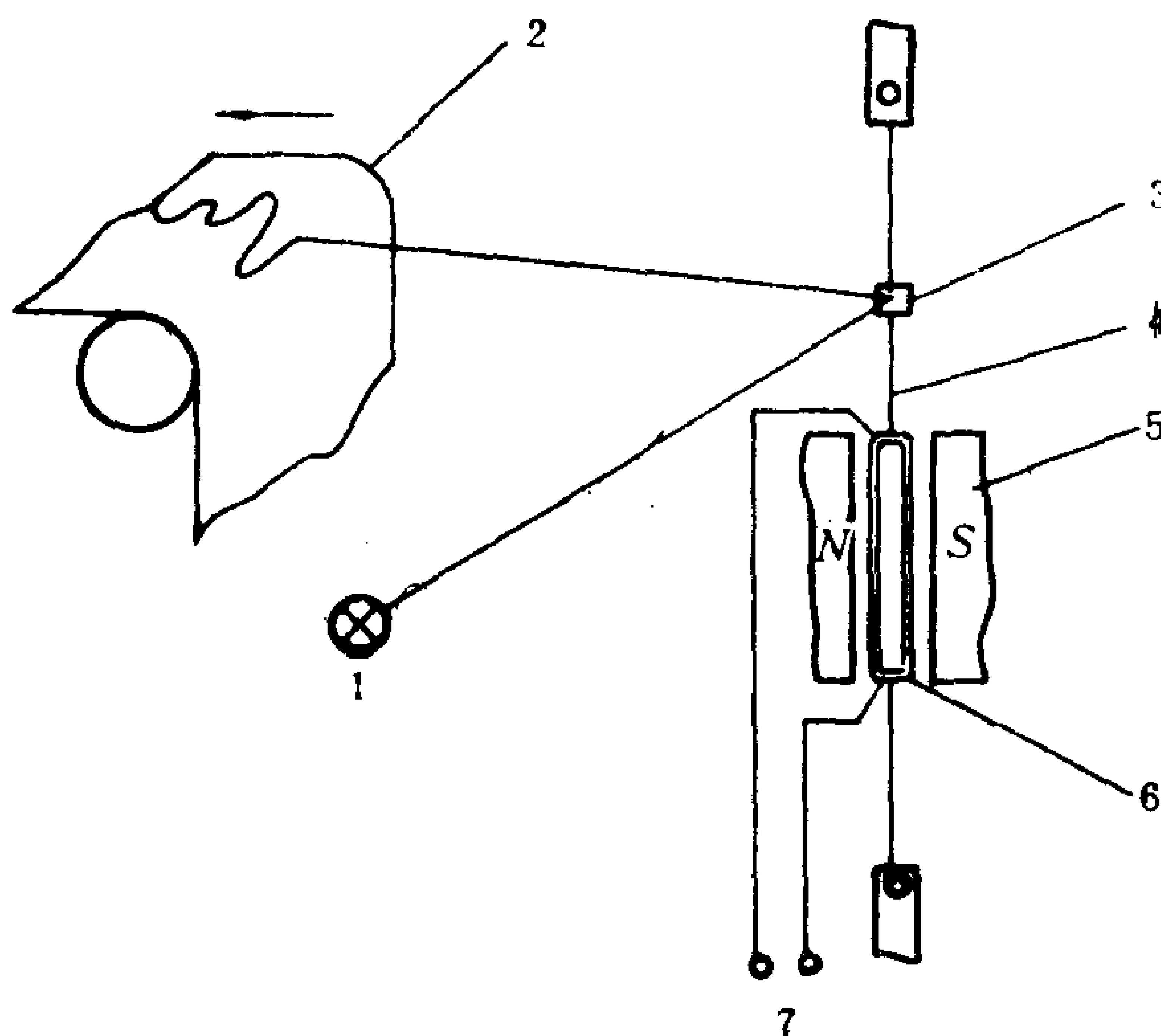


图 1.2.1-81　光线示波器原理图
1-光源；2-记录纸；3-小镜子；4-张丝；
5-磁钢；6-活动线圈；7-输入电信号

子，它由活动线圈、张丝、小镜子、磁钢等组成。当被测的电流信号加于活动线圈上时，因磁场作用，线圈产生摆动，通过张丝使得小镜子也随之摆动，当光源通过光学系统照射到小镜子上后，反射到记录纸上的光点将随着信号变化的规律而摆动。利用机械传动机构使记录纸以一定的速度运动，光点在记录纸上走过的轨迹就形成了对应于被测信号的波形。记录纸用感光材料作成，通过光学的或化学的显影、定影，便可得到被记录的波形，示波器中振动子可同时设置多个，即可同时记录多个信号。

光线示波器的优点：记录线数多，工作频率高，可直接记录，现场观看，体积较小和重量较轻。缺点：不便与计算机连接进行分析处理。

3.6.2　磁带记录仪

磁带记录仪是当代迅猛发展的一种记录仪。因其具有工作频率范围宽、信噪比高、线性好，能多路同步记录，能反复重放，随时把测量结果重现，便于分析处理，信号能抹去，磁带可以多次使用；能快记、慢放或慢记、快放，实现时基变化等优点。

1)磁带记录仪的主要结构和工作原理

它是利用磁带上的强磁介质磁化原理进行记录的一种仪器。其结构如图 1.2.1-82 所示。

（1）放大器

包括记录放大器和重放放大器。记录放大器将被测电信号放大后接入记录磁头，重放放大器将重放磁头的输出信号放大后输出。

（2）磁头

包括记录磁头和重放磁头，它是一种电磁变换器。当被测电信号接入记录磁头的线圈时，产生磁场使磁带上的缺磁性材料磁化、磁带上被磁头连续磁化的一条带叫做“磁迹”带。有

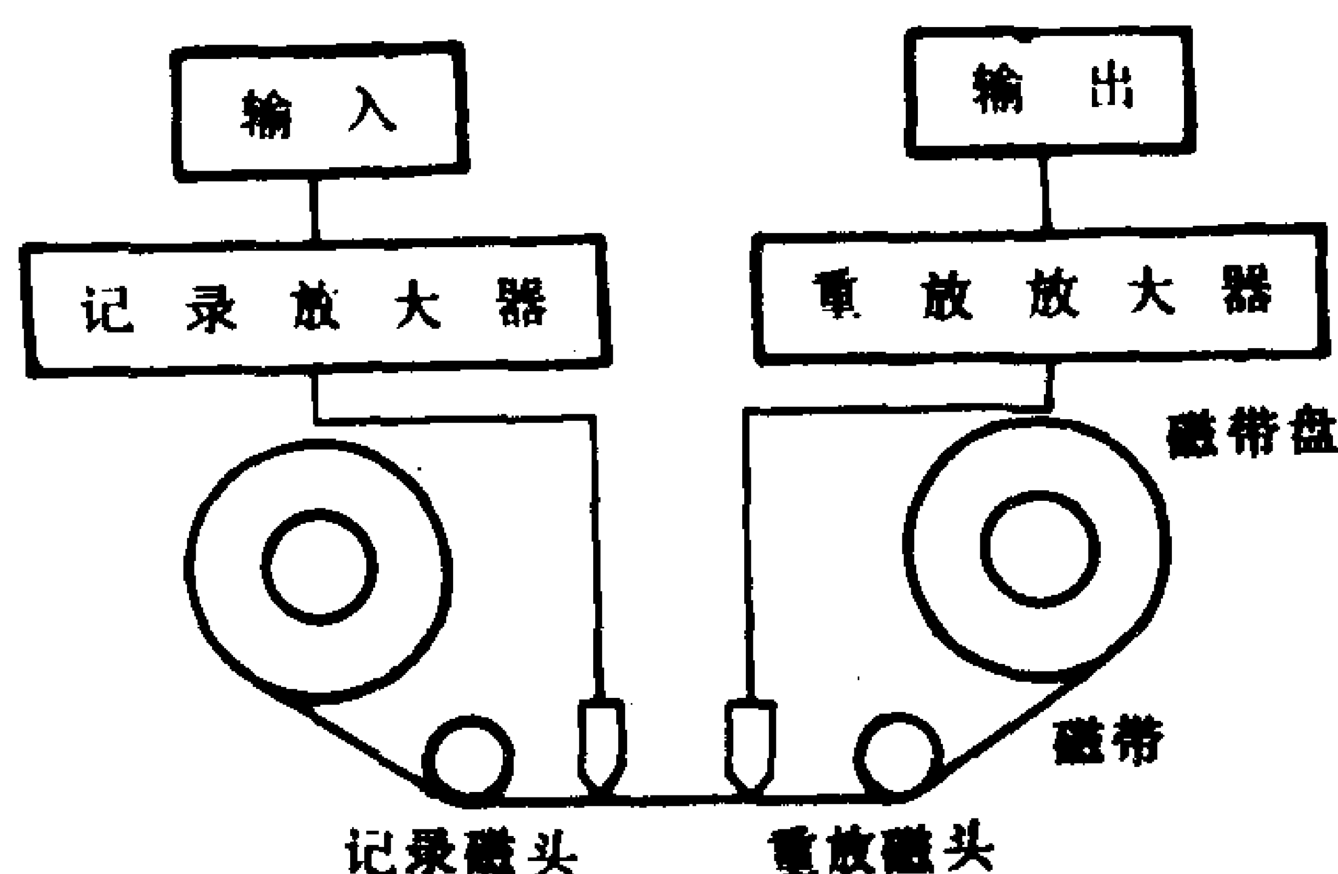


图 1.2.1-82 磁头记录仪组成框图

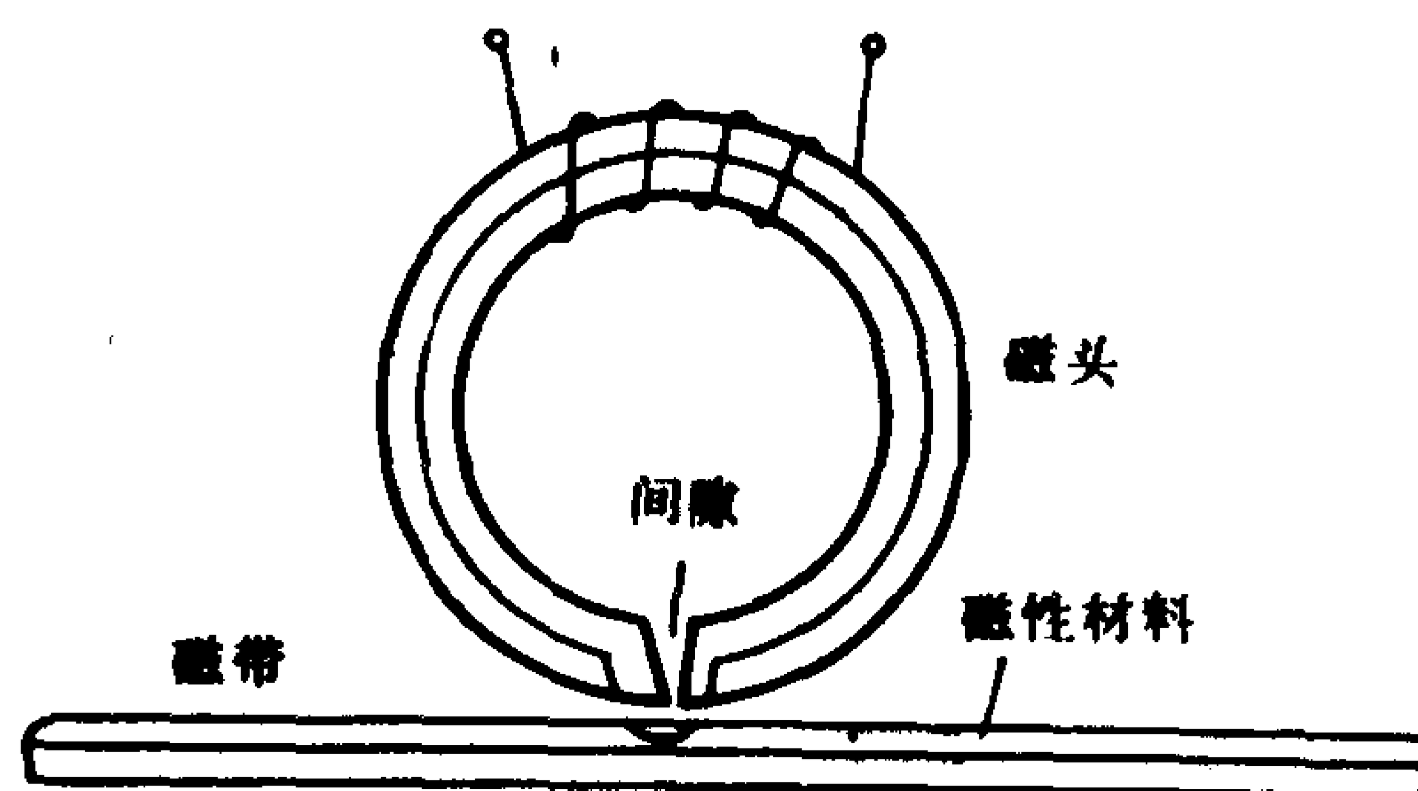


图 1.2.1-83 磁头结构原理图

磁迹的磁带经过重放磁头时，反映磁带上磁信号强弱的磁力线，通过重放磁头的铁芯，而在线圈中感生电压信号，此电压信号经过放大后输出，就实现了记录信号的再现，如图 1.2.1-83 所示。

记录磁头和重放磁头都可以由多个磁头组成，它们之间的间距决定了磁迹间距，而每一条磁迹宽度只有零点几毫米，磁迹间距可为 1 毫米多，所以在一条较宽的磁带上就可以实现多通道记录，常用的有 4 、5 、 7 、14 通道等。

（3）磁带

磁带是存贮信息的部件，由塑料带基和强磁介质涂层组成。

（4）传动机构

它用以拖动磁带，使其贴附磁头，以一规定速度，使磁带由一磁带盘出发，经过记录和重放磁头，传绕到另一磁带盘上。

2)磁带记录仪记录方式

摸拟磁带记录仪的记录方式，主要有直接记录式、调频记录式、多路调频记录式等。目前，大多使用前面两种。

（1）直接记录方式（*D*、*R*式）

直接记录方式是把输入信号放大后直接记录在磁带上而不进行波形变换。由于磁化曲线在原点附近和接近饱和区都是非线性的。只有中间一段是线性区，因此在记录信号的再现时将产生严重失真，如图 1.2.1-84 所示，为此通常在记录放大后的输入信号上，再迭加一偏磁信号，使记录的信号曲线始终在磁化曲线的线性区，从而消除重放信号的失真现象。当磁带和磁头接触不良时，输出信号就会下降。磁带上铁磁材料粒子不均匀，磁头不光滑，灰尘以及磁带机械损伤等原因都会造成磁带和磁头接触不良。*DR* 方式主要用作语言和声响的录制，不宜用于记录机械振动信号。

（2）调频记录方式（*FM*式）

在试验中，调频记录方式应用十分广泛。图 1.2.1-85 是频率调制记录方式原理图。输入信号 a 经放大送入调制器。调制器可采用压控式多谐振荡器，它的频率随输入信号大小而变化，调制后的波形，如图 1.2.1-85 b)所示，当电压正时频率增加，电压负时频率减小，

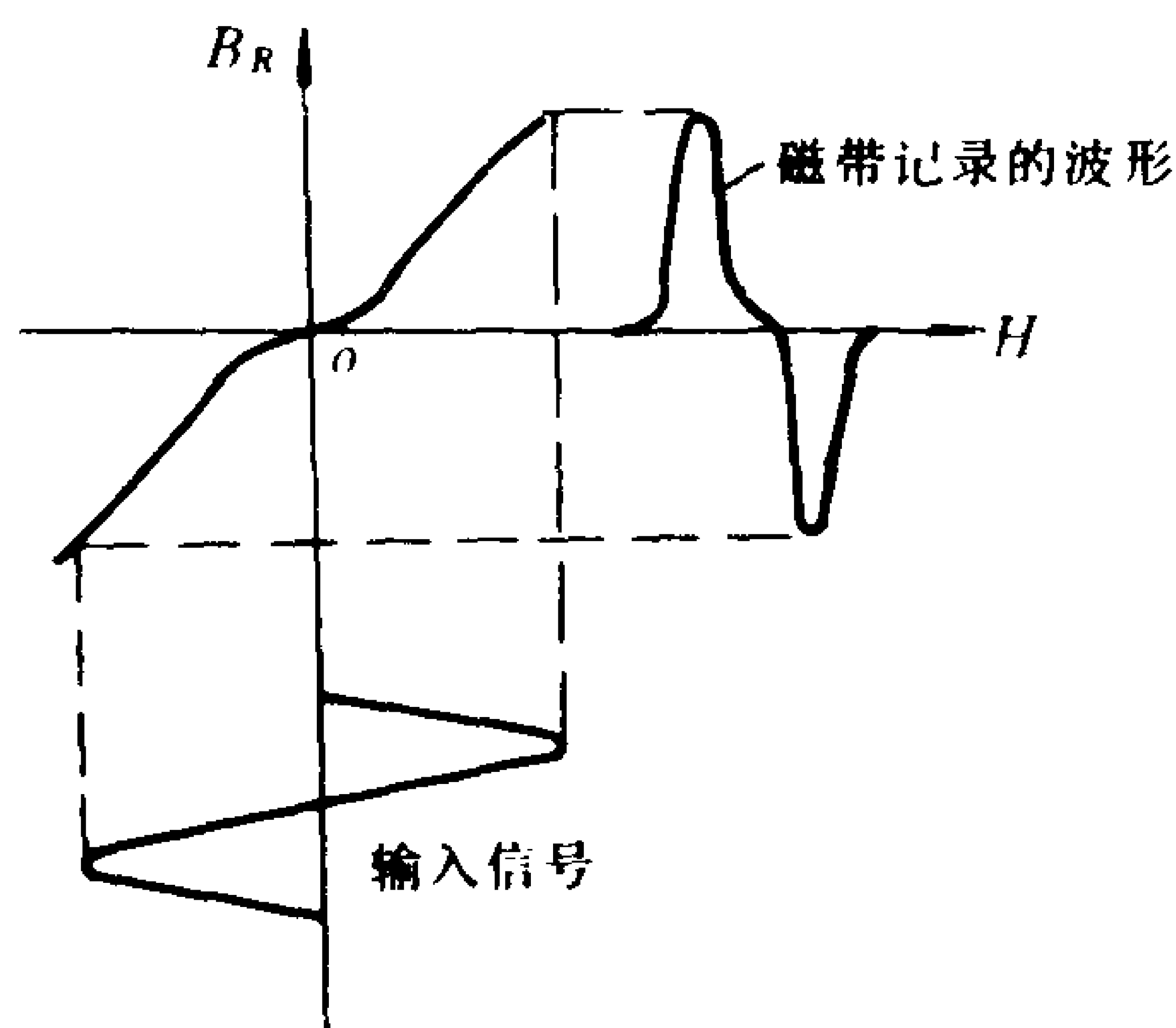


图 1.2.1-84　直接记录失真

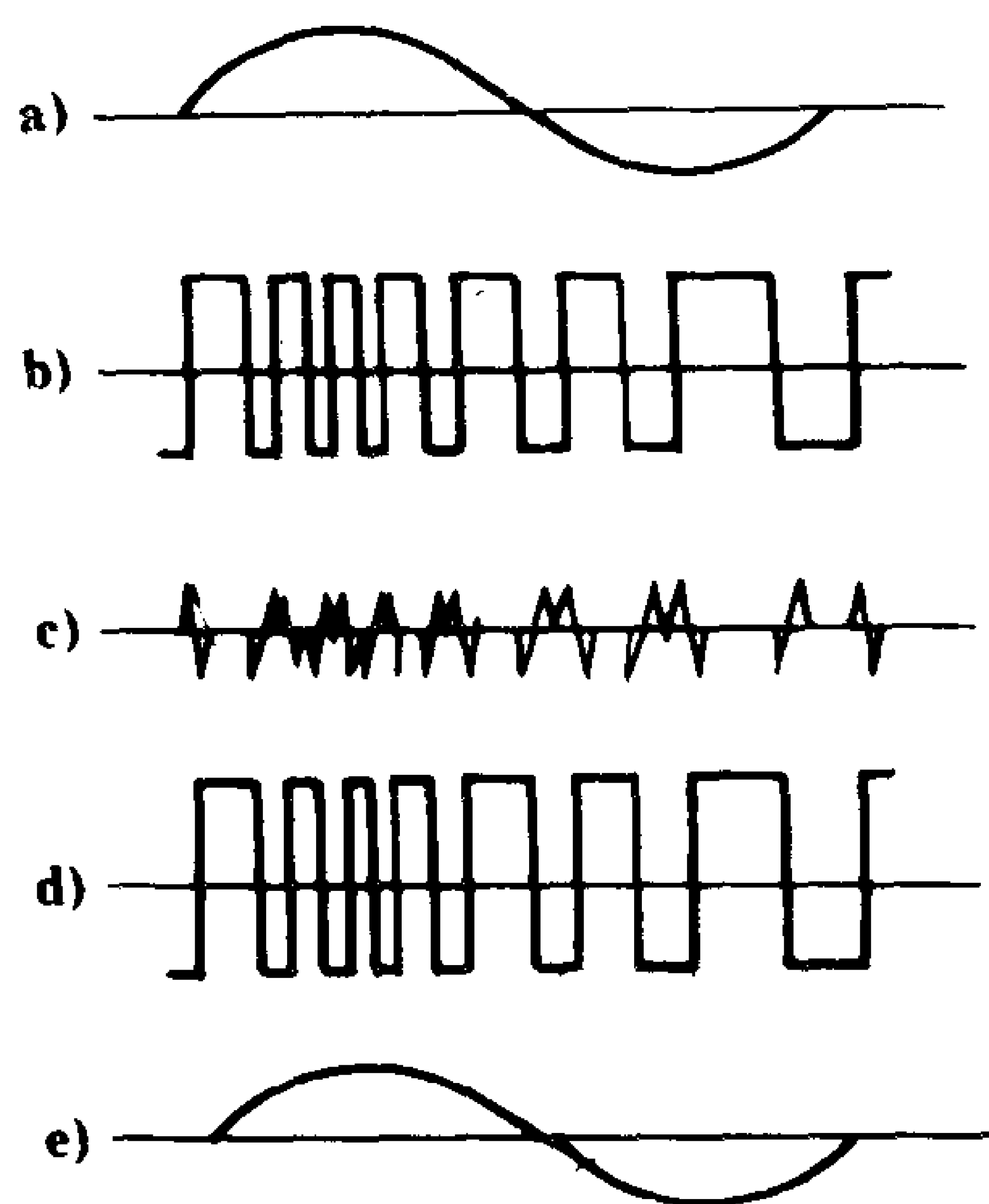


图 1.2.1-85　频率调制方式原理
a)输入信号；b)调制后的波形；
c)重放感生电压波形；d)放大整形波形；
e)输出信号

信号的大小与正负，用频率的增减和变化来摸拟。这种摸拟信号经录放大器后被记录磁头记录在磁带上，重放时，重放磁头感生的电压波形，如图 1.2.1-85 c)所示，它是b)的微分结果，经放大整形后波形如图 1.2.1-85 d)所示，再经鉴频和低通滤波后，获得与输入完全相同的输出。如图 1.2.1-85 e) 所示。

3)磁带记录仪的性能指示

磁带记录仪的性能指示很多，现主要介绍以下几个：

(1)磁通数

表示同步记录和同步重放多路数据的能力。

(2)直流漂移

记录放大器输入短路时，再生放大器直流输出电压的变化值对额定满辐输出值的比值，即为直流漂移，用百分比表示。

(3)工作频率

磁带单位长度上能记录的信号最多个数称为记录密度。有关标准把记录密度分为 4 类，对FM方式规定为：

窄频带——$\frac{1}{6}$ kHz/h；

中频带——$\frac{1}{3}$ kHz/h；

第一频带——$\frac{2}{3}$ kHz/h；

第二频带——$3\frac{1}{3}$kHz/h。

4)信噪比

在输入额定最大输入信号时，对应的再生输出电压有效值与零输入时再生输出的噪声电压有效值之比，为信噪比。用分贝表示。

3.7 噪声测量仪器

噪声测量是检测社会上噪声污染的主要项目。常用的仪器有声级计、频谱分析器和自动记录仪等。

3.7.1 声级计

声级计是噪声测量中最常用的基本测试仪器。这种仪器体积小。重量轻，一般用电池供电，便于携带。它不仅可以单独使用，进行各种计权声级和线性总声压级的测量，而且还可以和相应的仪器配套进行频谱分析、振动测量等。

声级计是由传声器、前置放大器、测量放大器、国际标准频率计权网络、衰减器、检波电路、平均电路、指示表头等组成。

声级计的工作原理，如图 1.2.1-86 所示，电压信号通过传声器转换成电压信号，经过前置放大器进行阻抗变换后，输入到测量放大器的输入衰减器。衰减器的旋扭分上、下两层，其下层控制输入衰减器，上层控制输出衰减器，可根据测量需要分别选择衰减量。在声级计测量电路中设立的国际标准频率计权网络，是声学仪器所特有的组成部分，它是从等响度曲线出发，模拟人耳听感特性，对不同频率的声音信号，实行不同程度的衰减，以使声学仪器的测量值近似于人耳对声音的响应。然后经过声级计的读数装置，由指示表头等把噪声的大小以分贝值显示出来。

传声器也叫话筒或微音器，它的功用是把声音信号转换为电信号，它是测声仪器的关键部件。测声仪器的频率响应、灵敏度、方向性和测量范围以及精度等，都与传声器直接有关。常见的传声器有 3 种类型：电动式传声器，压电式传声器和电容式传声器。

电动式传声器是按线圈在磁场中运动，切割磁力线而产生电势的原理制成的。其优点是价廉，温度影响小，能在较高的温度下工作，固有噪声低。缺点是体积较大，频率响应不平直、灵敏度较低，并易受磁场干扰，不能用于电机、变压器等周围。

压电式传声器又叫晶体话筒。它是利用具体压电效应的晶体，受声压作用而产生电势的原理制成。这种传声器结构简单、价格低廉、灵敏度较高，频率特性也比较平直，但受温度影响较大。

电容式传声器是由构成电容两个极板的振膜和背板所组成，振膜是一拉紧的金属薄膜，

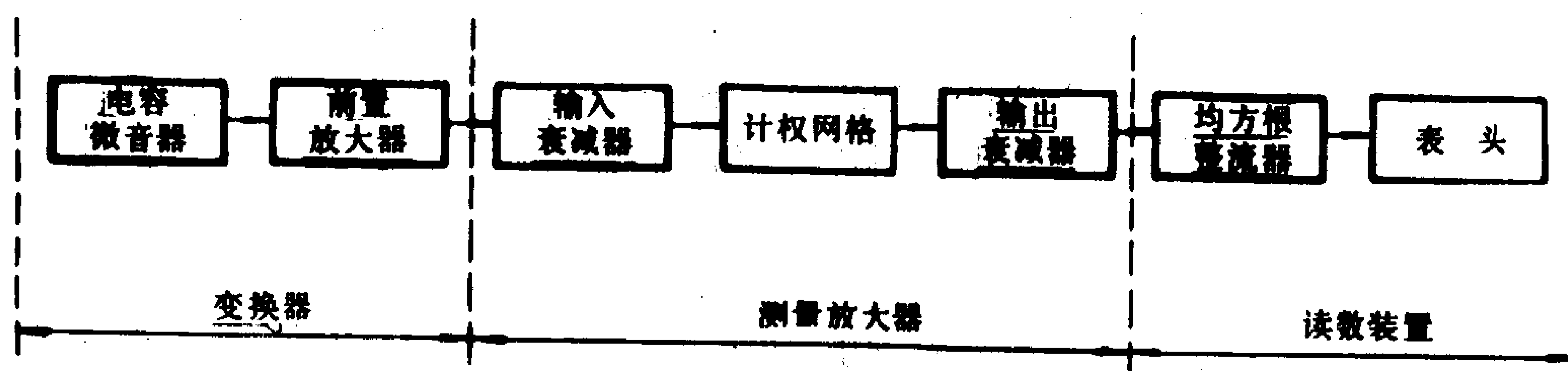


图 1.2.1-86 便携式精密声级计原理方块图

其厚度在 0.0025～0.05mm之间。振膜在声压的作用下能发生位变，起着可变电容器动片的作用。可变电容器的定片是背极。振膜和背极之间加有极化电压，使振膜和背极保持一个不变的充电状态。当振膜在声压作用下振动时，极板间的电容就出现了相应的变化，从而使板间产生与声压波动相应的电压变化。电容式传声器的工作特性稳定，频率响应平直，一般在－50℃到 150℃的温度范围和 0 到 100%的相对湿度范围内，输出性能几乎不变，灵敏度也较高，因此它适用于精密声级计。缺点是制造成本高、价贵。

声级计的电子放大器部分，要求具有较高的增益，并且在声频范围（20～20000Hz）内有平直的放大特性，要求有高的稳定性和较低的固有噪声。对于衰减器则要求每档能作分贝的衰减。

声级计中通常设有A、B、C三档频率计权网络。此外，在声级计上还有线性档“L”，这是在A、B、C等计权网络不等时，整个声级计呈线频率响应，用以测量噪声的线性总声压级。

声级计的表头读数为有效值。表头阻尼特性分为快、慢两档。快档用于测量随时间起伏小的噪声，当快档测量的噪声起伏大于 4 分贝时，应换用慢档。

3.7.2 频谱分析仪器

噪声是由大量的不同频率的声音复合而成的，为了分析产生噪声的原因，须对噪声进行频谱分析。

频谱分析仪是用来测量噪声的频谱特性，一般由滤波器与测量放大器组成，即将输入的动态信号经过一组滤波器，使被测信号中所含有的不同频率分量逐一分离出来，由测量放大器分别测量其幅值，其测量结果可由指示表头直接显示或使用记录器绘制出频谱图。若噪声信号通过一组信频程滤波器，则得到信频程噪声频谱，若通过一组$\frac{1}{3}$倍频程滤波器，则得到$\frac{1}{3}$倍频程噪声频谱；若通过一组窄带滤波器，则可得窄带噪声频谱。在柴油机噪声测量时，一般常用倍频程或$\frac{1}{3}$倍频程滤波器，在现场测量中为了简化测量，缩短测量时间，更多用倍频程带通滤波器与便携式精密声级计配套使用，进行噪声频谱分析。

3.7.3 声级记录仪

声级记录仪是自动记录声级变化的仪器，常用的有国产NJ-1型电平记录仪等。记录仪可以与声级计式与频谱仪等连用，即可把噪声的声级和频谱特性自动记录下来。

3.7.4 声级计的校准

使用声级计测量声压级时，应经常校准，以确保读数的准确性。通常应在每次测量前后各校准一次。两次差值不得大于 1 分贝，否则噪声测量结果无效。目前，最常用的校准方法是采用活塞发声器和声级标准器等小型专用标准声源进行校准。

1)活塞发声器校准法

这是现场测量中应用最经常而又最简便的方法。

活塞发声器内有一用干电池供电的微型电动机。其结构示意图，如图 1.2.1-87 所示，电动机带动一凸轮，使两个对称活塞作正弦移动。当活塞运动时，会引起腔内气体容积和压力的变化，由于活塞位移为正弦函数，因此气体容积变量和压力变化量也是正弦函数。用这一按正弦规律变化的压力变化量作为校准声级计的标准声源，可在传声器的振膜上产生 124 dB的声压级，其校准频率为 250Hz。

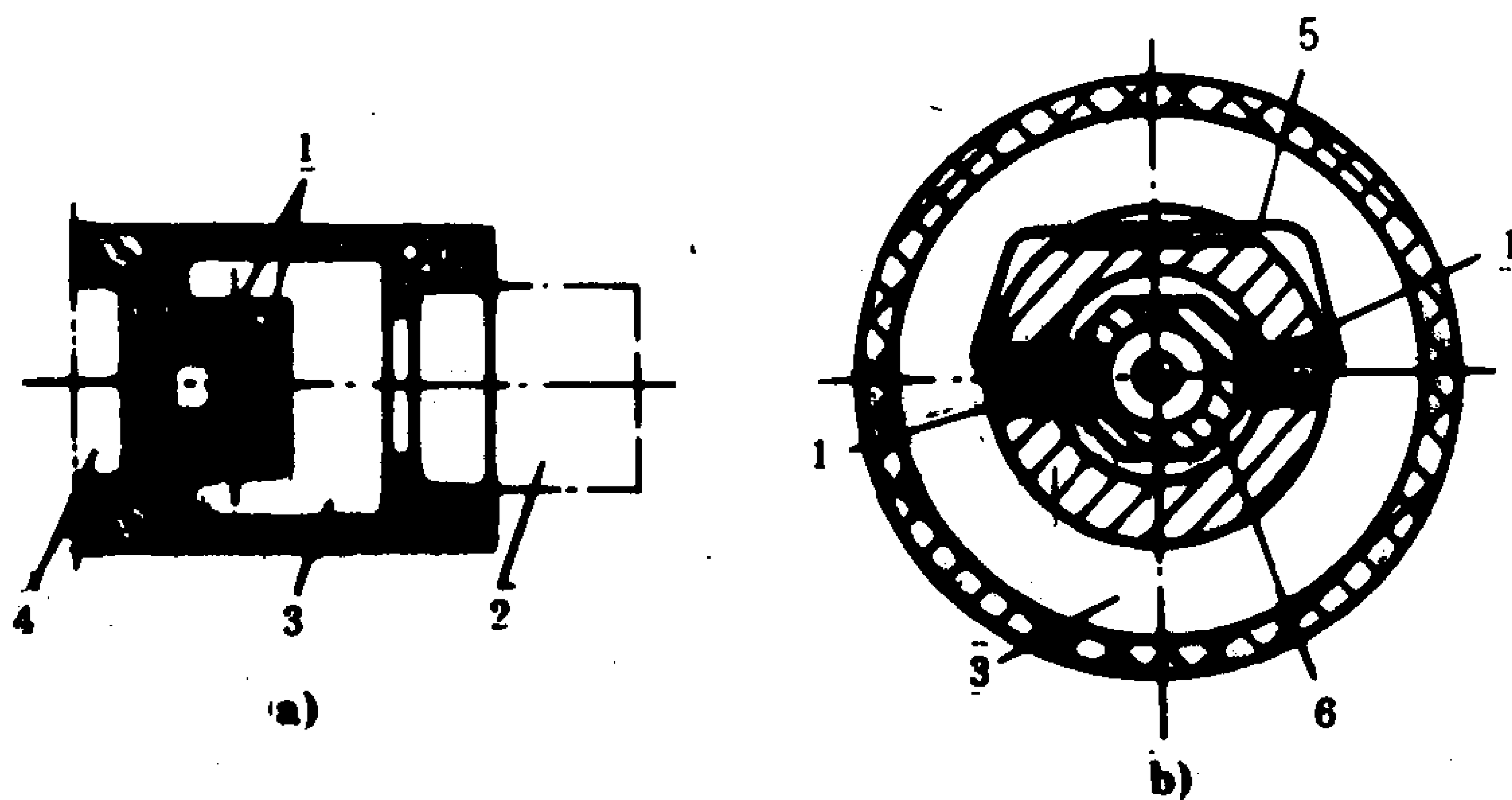


图 1.2.1-87 活塞发声器

a)结构示意图；b)局部放大图

1-活塞；2-标定的传声器；3-耦合空腔；4-电动机；5-复位弹簧；6-凸轮

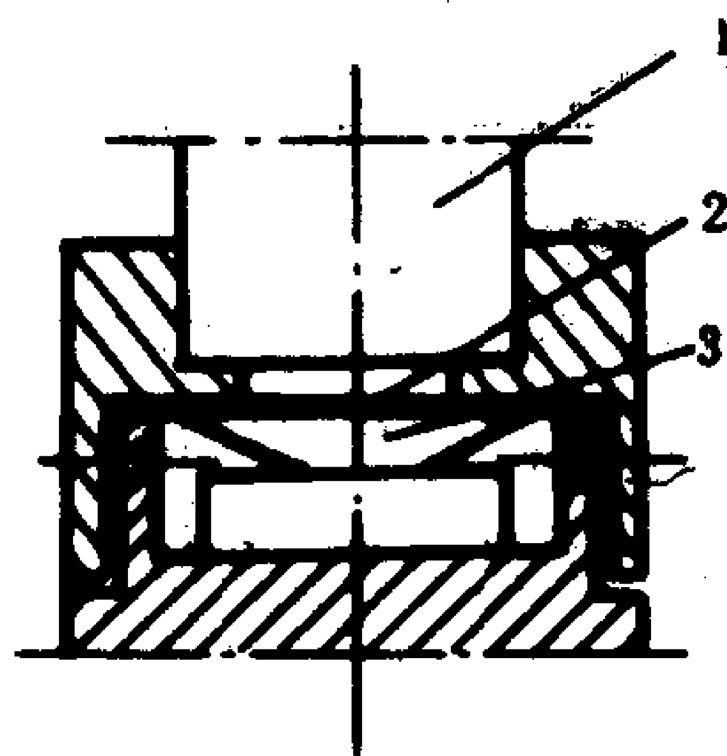


图 1.2.1-88 扬声器校准法

1-扬声器；2-耦合空腔；3-扬声器

2)扬声器校准法

扬声器校准法是利用一个经过精确标定过的扬声器在一个声耦空腔中产生频率为1000Hz的声压，该声压作用于被校声级计的传声器振膜上可产生 94 dB声压级。其结构如图 1.2.1-88 所示。

噪声测量使用的声级计用上述方法中任一种进行校准，均可满足校准精度要求。

参考文献

〔1〕杨光昇、魏荣年：柴油机测试技术，国防工业出版社，1984.12

〔2〕丁汉哲：试验技术，机械工业出版社，1982.7

〔3〕严钟豪、谭祖根：非电量电测技术，机械工业出版社，1983.6

〔4〕常健生：检测与转换技术，机械工业出版社，1983.6

〔5〕天津大学材料力学教研室：电阻应变仪测试技术，科学出版社，1980.11

〔6〕叶大均：热力机械测试技术，机械工业出版社，1981.9

〔7〕黄长艺、卢文祥：机械制造中的测试技术，机械工业出版社，1981.4

〔8〕张世箕：测量误差及数据处理，科学出版社，1979.7

〔9〕鲁景正、邱耀先、徐景福：船用柴油机设计手册，国防工业出版社，1982.7

〔10〕内燃機関：吸入空气量の测定，1976.9 增刊号

〔11〕柴油机设计—6：双扭线空气流量计设计，1975

〔12〕三轮、惠：デフーゼル機関燃烧室内の気の流シマエレーションと解析，内燃機関，1973.7

第 2 章　零部件故障与失效检测技术

1　概述

1.1　基本概念

机械故障是船舶机器或机器零件由于在尺寸、形状或材料性质方面的变化，而使其不能达到原设计要求的功能或参数。

机器在运转过程中，受到各种能量的作用，这些能量会影响机器的工作性能。这些能量是：

1)机械能　在机器工作过程中，机械能不但通过零部件来传递，而且因为与外部介质的相互作用，而以静载荷或动载荷的形式对机器发生作用。这些载荷是时间的随机函数，并且与复杂的物理现象有密切的联系。

2)热能　由于周围介质温度的变化或者机器在运转中的温度变化而对船舶机器和零件产生作用和影响。

3)化学能　由于周围介质的化学变化而影响船舶机器或零件的性能、甚至造成损伤。

4)辐射能　放射性物质释放出的辐射能，可以对材料发生作用并改变其机械性能。

5)电磁能　电磁能以电磁波的形式干扰电子设备的工作。

6)生物因素。

这些能量导致了机器零部件参数降低的过程。这些过程一般都和复杂的物理-化学现象紧密联系，使零件发生过度变形、磨损、疲劳、断裂或腐蚀等，引起输出参数的变化，最后导致故障发生。

1.2　故障分类

1.2.1　按故障造成的后果分类

1)功能故障　某一给定系统（包括机器）运行的功能遭到部分甚至全部丧失，造成系统工作中断。功能故障通常是因为机器零件损坏而造成的。

2)参数故障　由于故障使机器的性能参数超出了允许的极限值。参数故障并不妨碍机器运转，但是从技术经济标准来评价，机器发生参数故障时的工作性能和经济性是不佳的，甚至导致功能故障。

1.2.2　按故障的发展速度分类

1)突发性故障　由于外界随机因素或内部的潜在缺陷所造成突发性的故障。故障发生的概率与机器已运行的时间无关。故障发生前往往没有任何征兆，因而事先来不及检查预防。

2)渐进性故障　由于机器的损耗累积造成的故障。发生故障的概率与机器的使用时间有关。通常可以事先检测预防。船机的大多数故障属于这种故障。它与船机零件的磨损、腐蚀、疲劳及蠕变有关。

1.2.3　按故障发生的原因分类

1)人为故障　人为故障发生的原因为：

（1）违反规定的制造和装配技术条件；

（2）违反机器的操作规程和修理规定；

（3）机器的技术条件中没有考虑到的客观条件和因素。

2)自然故障　造成自然故障的原因为：

（1）机器使用条件的恶化；

（2）在技术条件允许范围内的材料缺陷等；

（3）为了减轻、缩小或简化机器结构，而在设计上允许的不致引起严重后果的故障。

1.2.4 按故障发生的规律分类

1)随机性故障　这种故障的发生是没有规律的，故障发生的时间分布是不能预知的，它又可分为有发展期的随机性故障和无发展期的随机性故障。前者可以通过工况监测检查，其监测间隔期应比故障发展期短，而后者不能通过工况监测来检查。

2)规律性故障　规律性故障具有逐渐发展的过程，并符合某一已知的和(或)可测定的模式。

1.3　故障模式

故障模式是机械产生故障的物理过程，有些故障模式是单个的现象，而有些却是复合的现象。故障模式有助于分析判断零件故障产生的原因，找出预防和诊断故障的有效途径。

常见的故障模式有：

1)屈服　工作载荷或运动使机械零件产生能影响机器正常工作的塑性变形。

2)凹痕　相互接触的弧形表面间的静力使一个或两个配合表面形成局部屈服，从而造成较大尺寸的表面不连续。

3)断裂

（1）塑性断裂　塑性材料零件的塑性变形达到极限，致使零件分离成多块。零件内部的晶粒被拉长成细条状，故断口呈纤维状且灰暗无光。

（2）脆性断裂　脆性材料零件的弹性变形达到极限，致使零件断裂成多块。零件在断裂前没有经过明显的塑性变形，其断口呈晶粒状和多面状。

4)疲劳　很多船机零件在工作时承受交变应力的作用，当交变应力的数值和作用次数超过极限值时，就发生疲劳失效。根据交变应力的大小及起因，疲劳又可分为高频疲劳、低频疲劳、热疲劳、表面疲劳、冲击疲劳、腐蚀疲劳及微动疲劳等。

5)腐蚀　由于化学或电化学作用使材料破坏，导致机械零件失去其正常的性能。腐蚀常与磨损或疲劳等故障相互作用。腐蚀有多种形式：化学腐蚀、电化学腐蚀、裂隙腐蚀、、晶间腐蚀、浸蚀、应力腐蚀、氢损伤等。

6)磨损　物体表面相对运动时，由于机械作用和化学反应过程，引起摩擦表面的物质逐渐损耗或产生残余变形，称为磨损。磨损的种类包括：粘着磨损、磨料磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损、冲击磨损及微动磨损等。

7)气蚀(又称穴蚀)　零件与液体相接触并存在相对运动的情况下，由于零件在动载荷作用下产生强烈的振动，致使零件与液体接触处不时地产生瞬时的局部高真空和高压，这时处在高真空区（或附近）的液体因低于它的蒸发压力，因而蒸发成为汽泡，同时溶解在液体中的气体亦可能析出。当汽泡流到高压区，其压力超过汽泡压力时，汽泡便收缩溃灭，产生瞬时压力波，其瞬时局部压力可达到1000×10^5Pa，零件表面由于受到这种很高的冲击、挤压应力的反复作用，便产生疲劳破坏而逐渐脱落呈麻点状，随后扩展呈泡沫海绵状。气蚀是一种

比较复杂的破坏现象，它往往不单纯是机械力所造成的破坏，液体的化学和电化学作用，液体中含有磨料等均可加剧这一破坏过程。

8)微动　在两个由法向力相互压紧的零件表面间所发生的低振幅循环振动称为微动。微动通常发生在紧固零件之间。微动的种类有：微动磨损、微动疲劳及微动腐蚀等。

9)蠕变　在温度上升或高温条件下，当零件的应力不变而其塑性变形缓慢连续增长的现象称为蠕变。

10)咬死　零件的接触表面发生严重粘着或转移，使其相对运动中止的现象称咬死。

1.4　故障规律

在机器使用的全过程中，机器及零部件发生故障的次数（故障率λ）是不同的。大量的现场使用和试验结果表明：典型的机器故障率与其使用时间的关系可用“浴盆曲线”(故障率规律曲线）表示，如图1.2.2-1所示。在“浴盆曲线”中，机器使用全过程可分为早期故障期、随机性故障期和磨耗故障期3个阶段。在这3个阶段，故障发生的次数(故障率λ)及其变化规律各不相同。

1)早期故障期　早期故障期又称磨合期，它发生在机器工作的初期阶段，其特点是：故障率较高，但随着运转时间的增长而迅速下降。较高的故障率主要是由于设计、制造或装配安装中的缺陷，操作不熟练和使用条件不适应等引起的。例如，设计欠周到，材料选用不合适，制造误差，装配不当或零部件配合不协调等。通过试车调整，磨合，更换有缺陷的零件，故障率很快下降并趋向于稳定。在机器的使用全过程中，早期故障期为时很短。

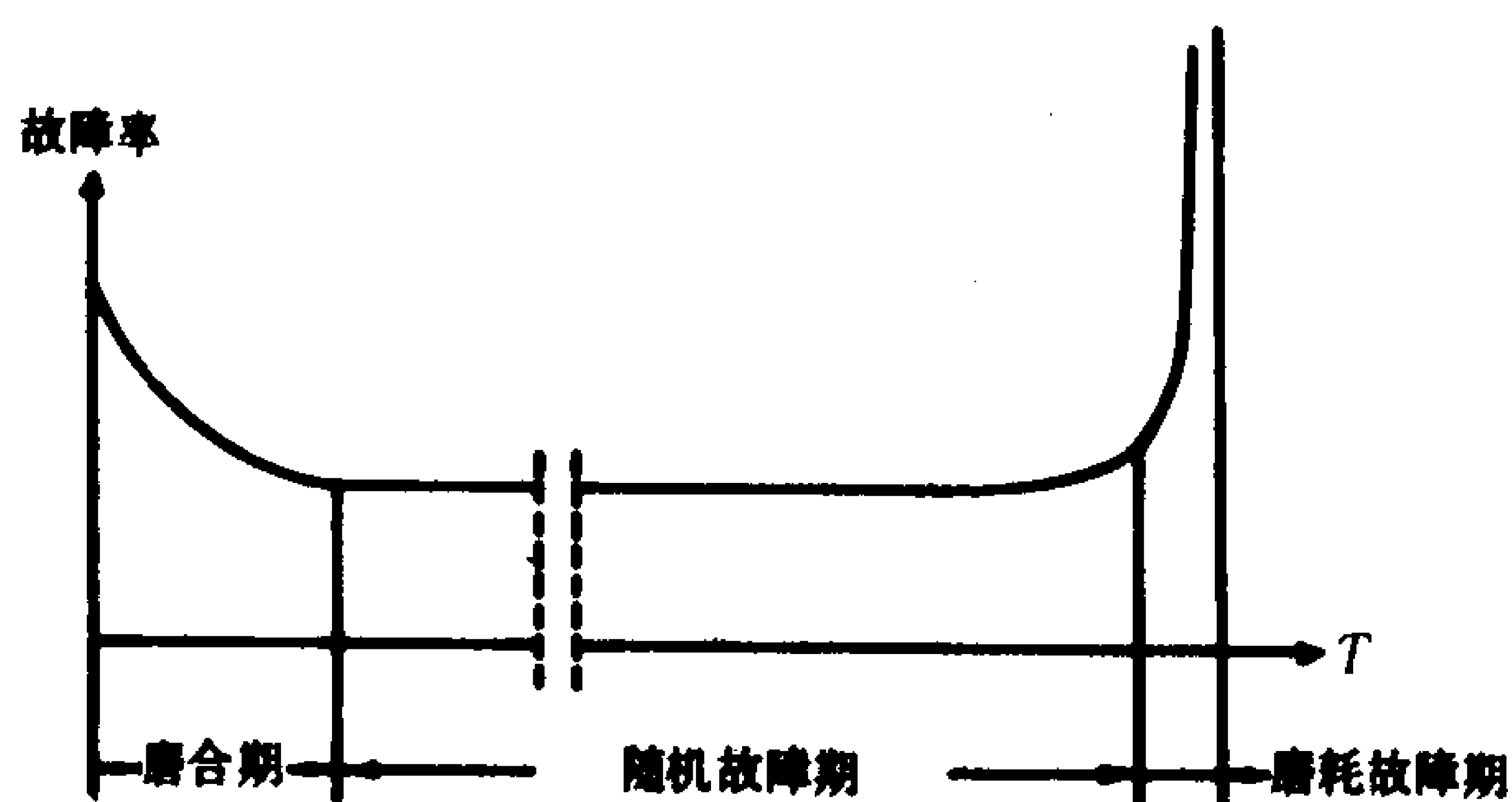


图1.2.2-1　故障率规律曲线

2)随机性故障期　又称为偶然故障期，其特点是：

（1）发生的故障是偶然因素引起的随机性故障，这些因素主要是设计，制造中潜在缺陷的突然发生，操作差错，维护不良和环境因素等造成的。

（2）故障率低而稳定，近似于常数，它的大小与机器工作时数的关系不大。

（3）随机性故障期的延续时间较长，是机器的主要使用期。

3)磨耗故障期　它处在机器使用全过程的后期，其故障率随着机器工作时数的增长而迅速上升。它是由于机器及其零部件的物理或化学作用导致的磨损、疲劳、腐蚀所引起的。处在磨耗故障期的机器工作效率差，维修次数及费用均增加，若不进行修复，将导致机器损坏。

1.5　故障诊断检测技术

故障诊断检测技术是监测机械的性能参数、尺寸、形貌以及材料性能等状态变化的技术，它们可以在机械不解体的情况下，根据机械及其零部件状态的变化，分析机械故障的部位和原因并预测机械状态的发展趋向。因此，故障检测诊断技术可以在保证机械安全运转的前提

下，提高机械设备使用率，减少机械的修理时间和修理费用。

1.5.1 故障诊断检测技术的分类

1)性能参数监测 利用各种传感元件测量运行中机器的相应性能参数值，进行数据处理，与基准参数值比较，分析参数值的变化趋势，以判断故障部位及其后果。

2)振动监测 机器运转时，会产生振动和噪声，在不同的工况或磨损状态下产生的振动信号亦不相同。振动监测技术是利用这一特征来监测和诊断机器内部的故障并进行预报。振动监测包括采集振动信号，分析处理振动信号，分析和识别故障，用图形或数字进行显示。振动监测技术是现代诊断技术的一个重要方法。

3)磨损监测 机器运转时，其摩擦副相互摩擦而发生磨损，磨损过程中产生磨粒，磨粒的数量、尺寸、形貌和成分与机器的磨损状况有直接的关系如图 1.2.2-2 所示。磨粒监测就是通过采集和分析存在于机器润滑剂内的磨粒数量、尺寸、形貌和成分来监测和诊断机器的磨损工况和故障。磨损监测技术包括光谱分析、铁谱分析、旋转铁谱仪以及磁塞等多种方法。

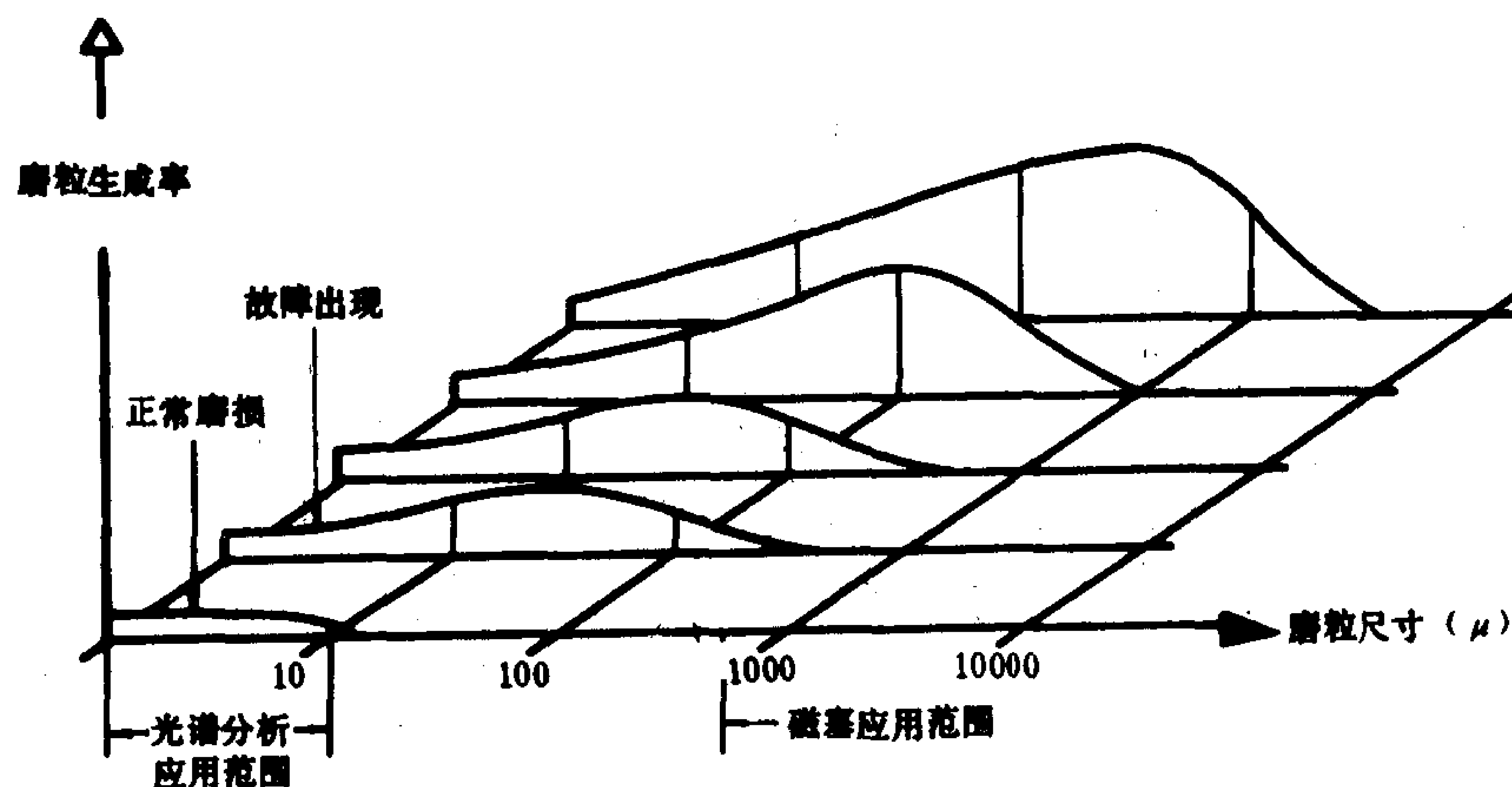


图 1.2.2-2

4)无损检测 无损检测技术是在不破坏机器及零件的形状，不改变其性能的条件下检测其表面与内部缺陷等的方法。无损检测的方法很多，常用的有射线检测、超声波检测、磁粉检测、渗透检测、温度检测及光学检测等。

1.5.2 实施故障诊断检测工作的注意事项

1)熟悉故障诊断检测技术的原理，特点与应用范围。

2)制订监测大纲，对实施工况监测的机械进行全面的了解，掌握其基本性能，运行记录，故障的统计，确定监测的目的、内容、手段以及可达到的经济效益;

3)从技术和经济角度选择合适的仪器设备;

4)确定适当的组织形式以保证人员的素质和各部门间的配合。

2 性能参数监测

性能参数监测是把机械性能参数的变化同它产生的后果联系起来的监测方法。性能参数监测是通过测定机械设备的各项性能参数值如温度、压力、油耗率等，将这些数据进行处理，然后同基准参考数值相比较，得出一定的结论，从而可以了解机械设备的运行状况，并分析

判断其故障部位及发展趋势。

性能参数监测中所采用的参数值随机器功能的不同而异；一般包括基本参数、主要参数和次要参数 3 类。基本参数有：长度、质量、时间、电流、温度和光强等。主要参数是由基本参数推导出来的，如力、压力、功、能量、功率、电荷、电位差、电阻、电容、电感和导热率等。由各个量之间的内在联系推导出的次要参数有：力矩、冲量、流率、燃料消耗率、单位燃料消耗率等。

性能参数监测的参数值是通过相应的传感元件来测量，然后将参数值记录下来，进行分析。记录的方法多种多样，最简单的是由操作人员记录在运行日志上，它只适用于测量参数值较少的机械；以后发展为由仪表或传感元件测量并用数字或曲线显示；目前已发展为自动巡回检测，打印输出及自动报警等。并已组成各种类型的自动化检测系统。

性能参数监测是柴油机监测的基本方法之一。柴油机性能监测的参数主要是热力参数，它们包括：油、水系统的温度与压力、各缸的排气温度、进、排气平均压力、各种压力差、曲轴箱压力、空气流量、转速、功率、各缸指示功率、油耗、气缸示功图、喷油压力曲线、进、排气管压力波、压缩压力和爆发压力等。柴油机性能监测装置的种类较多，简繁不一，有的是测量单项参数，如利用脉冲周期法测量柴油机转速，经过数学处理后得出柴油机转速波动曲线，以判断柴油机的工作情况。又如在柴油机曲轴箱上设置正压传感器，在曲轴箱内压力超过极限值时报警。有的装置可检测柴油机气缸内工作状态，如微电脑柴油机工况监测系统可以显示并打印出缸内气体压力值，搜索或算出发火时刻、气缸压力、各缸功率等。又如挪威的 “DA TA TREND” 系统是用于上冲程大缸径船用柴油机的监测系统，它包括 100～150 个分别装在被测零件相应部位的传感器，此系统可以监测气缸内的温度和压力，监测活塞环、涡轮增压器和空气冷却器等的工况，它还有趋势分析功能，可以储存测量的数据作为视情维修的依据。

3 振动监测

3.1 机械振动

振动是随机械传动产生的物理现象。机械的制造偏差和装配间隙，零件间的摩擦和磨损以及回转或往复运动零件的不平衡力都能引起振动，有时微小的振动甚至能激发起其它结构或零件的共振而放大成为主要的振动源。在大多数情况下，振动对机械起着不良的作用。当机械内部发生异常情况时，机械的活力性能就变化，使作用在机械零件上的一些力发生变化，从而引起其振动的幅值和性质的变化。所以，通过测量和分析机械的振动，就可以在不停机和机械不解体的情况下了解机械的劣化程度和故障特征。

机械振动是机械动力系统随时间变化的振荡运动。机械振动可以用以下的一些运动量和特征量来表达：位移值、速度值、加速度值、幅值、频率值以及振动量的均方根值或有效值(RMS)。按照振荡运动的不同形式，可以归纳为以下几种运动。

3.1.1 简谐振动

当位移、速度和加速度等运动量随时间按谐和函数变化，如图 1.2.2-3。这种运动称为简谐振动，它是最基本的振动形式。

简谐振动的位移函数x为：

$$x = A\sin(\omega t) = A\sin(2\pi f t)$$

$$= A\sin(\frac{2\pi}{T}t), \qquad (1.2.2\text{-}1)$$

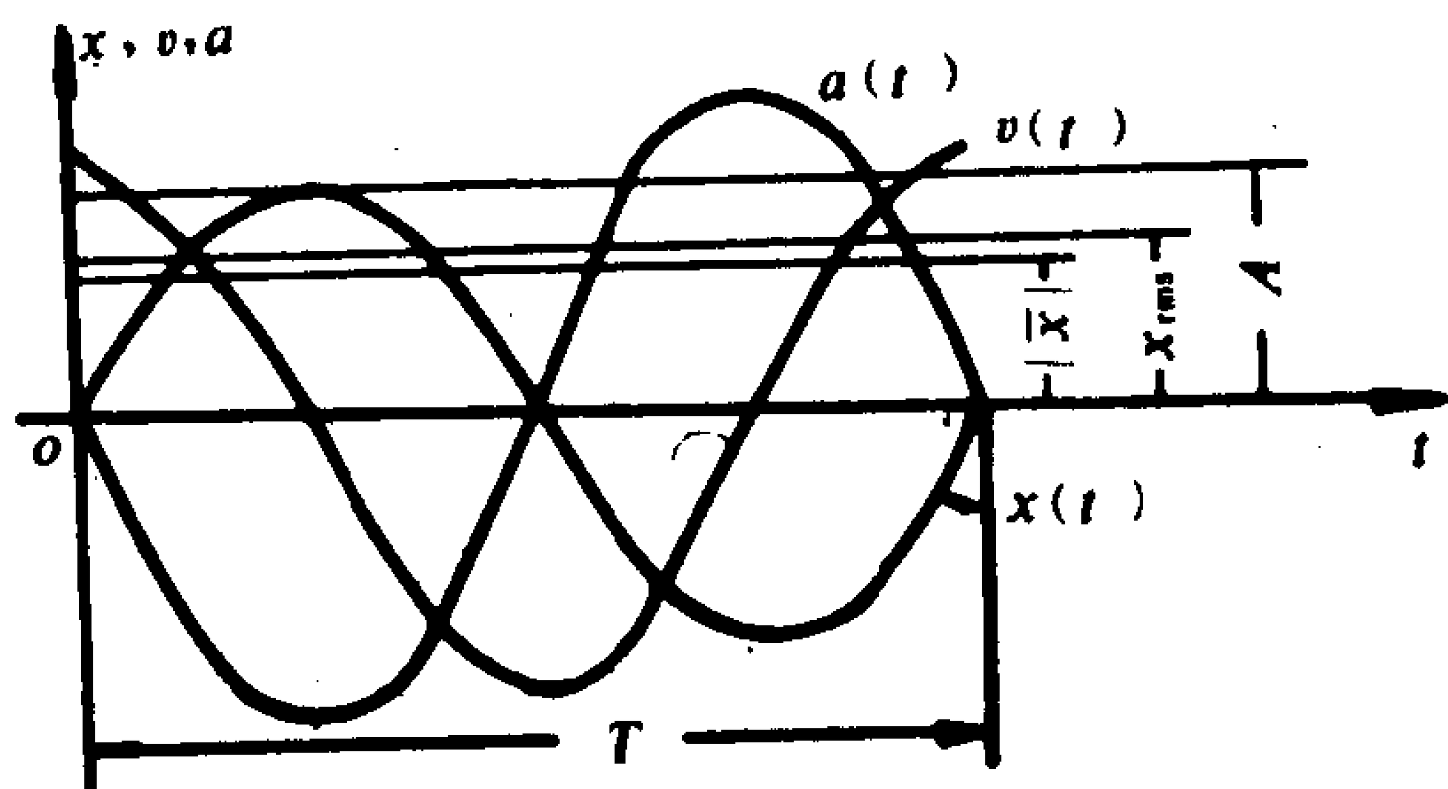


图 1.2.2-3 简谐振动

式中：A——位移幅值，mm或μm；

ω——振动角频率rad/s；

f——振动频率，$f=\frac{\omega}{2\pi}$，Hz；

$T=\frac{1}{f}$——振动周期，s。

简谐振动的速度v为：

$$v=\frac{dx}{dt}=\omega A\cos(\omega t)=2\pi f A\cos(\omega t)$$

$$= V\sin(\omega t+\frac{\pi}{2}) \qquad (1.2.2\text{-}2)$$

式中，$V=\omega A=2\pi f A$ 是简谐振动的速度幅值。振动的速度是指振动位移函数对时间的一阶导数。

简谐振动的加速度a为：

$$a=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2 A\sin(\omega t)=a_0\sin(\omega t+\pi) \qquad (1.2.2\text{-}3)$$

式中，$a_0=\omega^2 A$ 是简谐运动的加速度幅值。振动的加速度是指振动速度函数对时间的一阶导数，或振动位移函数对时间的二阶导数。

简谐振动的特点是其位移、速度、加速度随时间变化的规律都是同频率的谐和函数，它们的幅值之间有下列关系：

$$a_0=\omega v=\omega^2 A \qquad (1.2.2\text{-}4)$$

它们其相位关系是：速度波形超前位移波形$\pi/2$，加速度波形超前速度波形$\pi/2$。

有效值又称为均方根值，它是均方值（即振动量的均值）的平方根。

位移振动量x的有效值为：

$$X_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)\,dt} \qquad (1.2.2\text{-}5)$$

简谐振动中，位移的有效值为：

图 1.2.2-2 磨粒分布

$$X_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T A^2\sin^2(\omega t)\,dt}=\frac{1}{\sqrt{2}}A$$

$$(1.2.2\text{-}6)$$

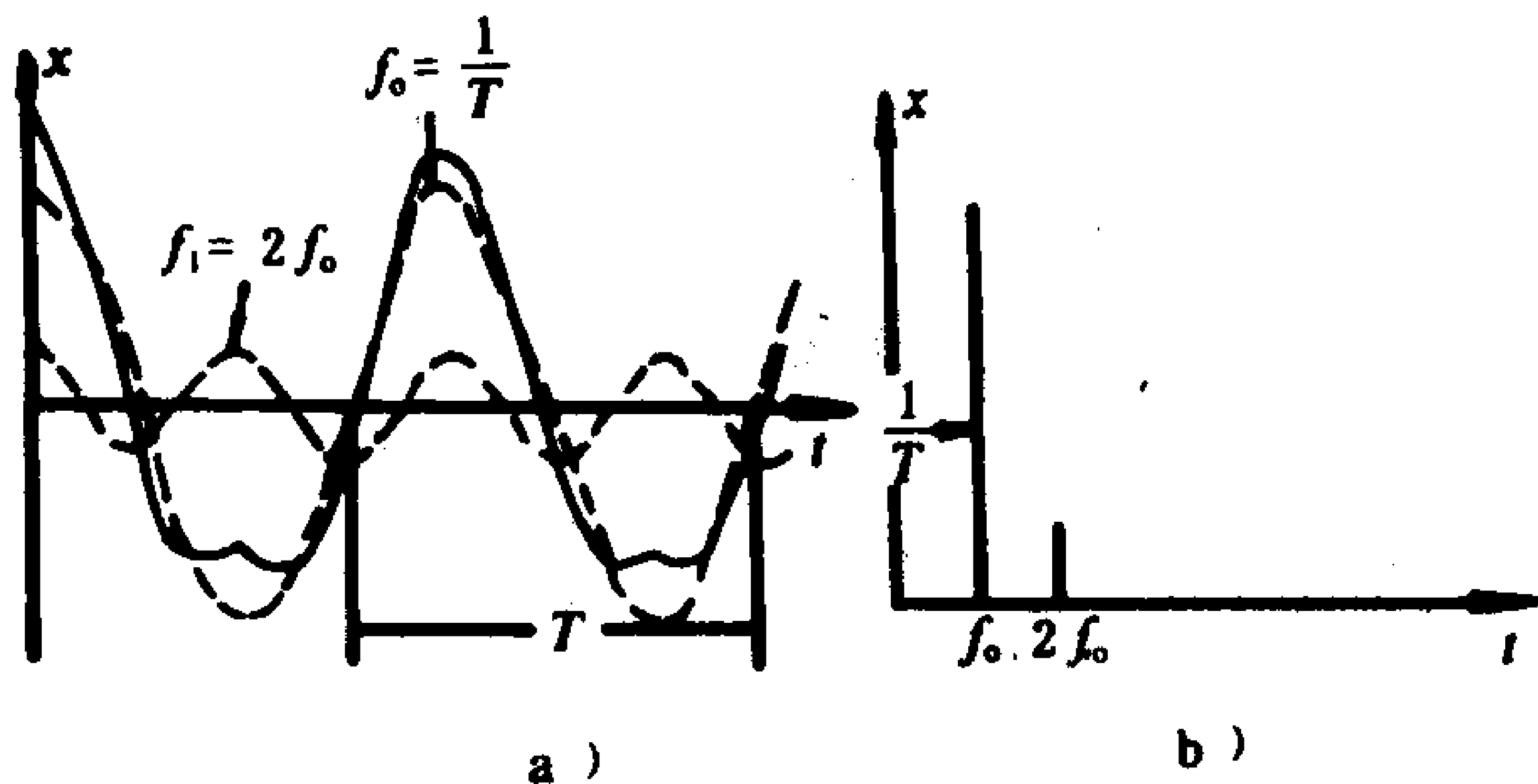


图 1.2.2-4 周期振动

3.1.2 周期振动

每经过相同的时间间隔、其振动量就重复出现的振动称为周期振动，如图 1.2.2-4 所示。简谐振动是最简单的周期振动。周期振动的一般数学表达式为：

$$x(t)=x(t+nT) \quad (n=0,1,2,\cdots)$$

$$(1.2.2\text{-}7)$$

式中，周期T是波形最短的重复时间。通

常周期运动可以分解为若干个简谐振动，如图 1.2.2-4 a)所示，周期振动的曲线是由虚线 1 和虚线 2 两条谐和曲线叠加而成。虚线 1 的幅值为A_1，角频率为ω_1，$\omega_1=\frac{2\pi}{T}$ 称为基频，T是周期；虚线 2 的幅值是A_2，其角频率$\omega_2=2\omega_1$，ω_2称为倍频。这两条谐和曲线可用其幅值与频率来表示。旋转机械在运动时常发生周期振动。

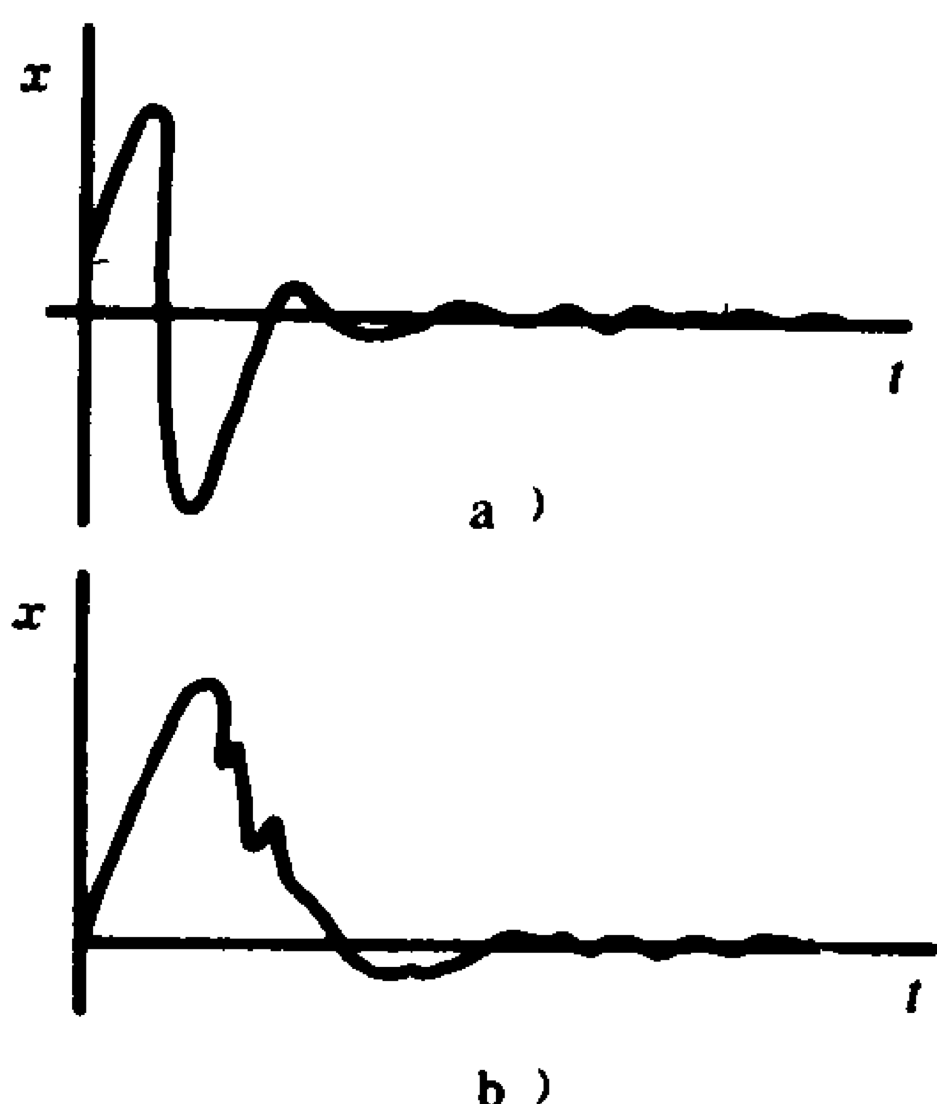


图 1.2.2-5 非周期振动

3.1.3 非周期振动

如机械振动量随时间的变化是非周期的，则称为非周期振动，如图 1.2.2-5 所示。船舶的碰撞和滚动轴承损伤时所产生的振动都是非周期振动。其共同特点是过程突然发生，持续时间很短，能量却很大。

3.1.4 随机振动

在任何给定时刻中，其瞬时值不能预先确定的振动称为随机振动。它们随时间变化的记录曲线是杂乱的，任何时刻之间的振动值没有确定的联系，如图 1.2.2-6 所示。

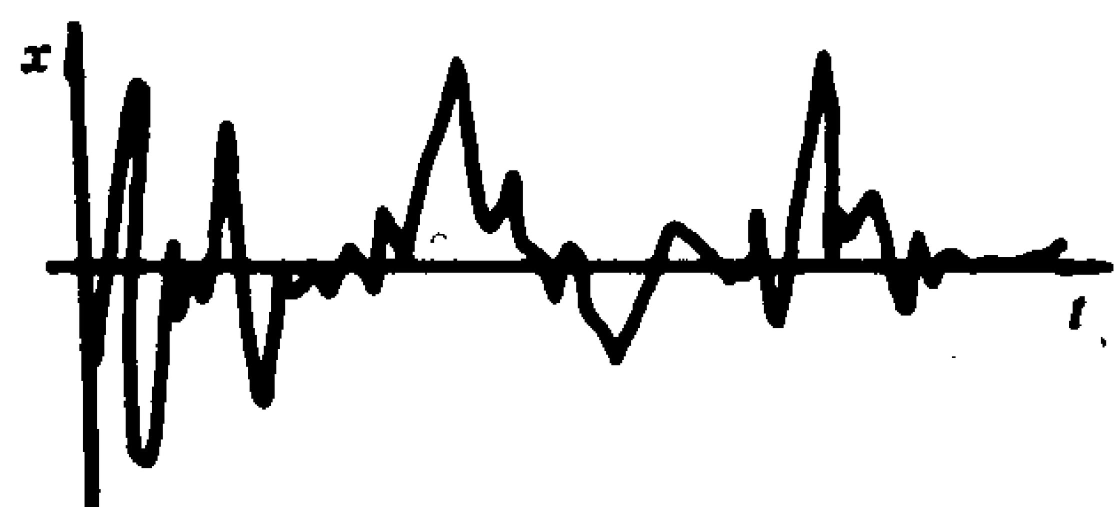


图 1.2.2-6 随机振动

3.2 传感器

振动的参数有加速度、速度和位移 3 种。因此，测量振动参数的传感器分别有速度、加速度和位移传感器 3 种。它们可以分别测取机械振动的速度值、加速度值和位移值。根据其工作原理，又各有多种类型。

3.2.1 压电式加速度传感器

加速度传感器(又称加速度计）有压电式和随动式两种，压电式加速度传感器具有固有频率高、体积小、重量轻、精度高及适用温度范围广等优点，因而在设备故障诊断中使用最为广泛。

1)工作原理　某些晶体在受到力的作用时，其表面就产生极化现象。在垂直于受力方向的一个表面上产生正电荷，而在另一个表面上产生负电荷，两表面之间相当于一个绝缘体，当外力去除后，又恢复不带电状态。这种现象称为压电效应。这类晶体称为压电晶体。天然石英晶体、压电陶瓷和锆钛酸铅等都是压电晶体。

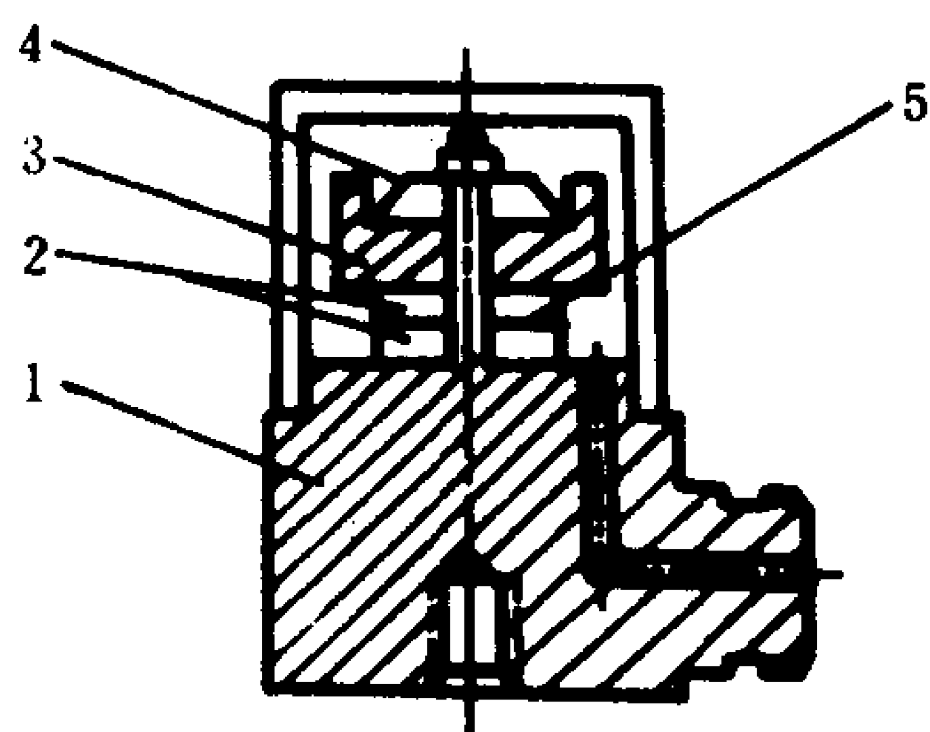


图 1.2.2-7 压电式加速度传感器

1-底座；2-压电晶体圆片；3-质量块；4-弹簧片；5-导电片

利用压电效应工作的加速度传感器，称为压电式加速度传感器，如图 1.2.2-7 所示。它是将两片压电晶体圆片和质量块，通过芯轴上的螺母压紧在一个厚金属底座上。由强弹簧片施以预加力，以防止测振过程中压电晶体圆片与质量块脱开。工作时，压电晶体表面产生的电荷与所受的弹性力成正比，即与质量块相对于底座的相对位移成正比，因此，总电荷量正比于被测机械的振动加速度。

2）工作特性

（1）灵敏度

压电式加速度传感器相当于一个电压源或电荷源，其灵敏度可用电压灵敏度或电荷灵敏度表示。灵敏度随质量块的增大而增大，因此，灵敏度的大小受到质量块及传感器尺寸的限制，一般说来，压电式加速度传感器的电压灵敏度为 2 ～10^4mV/g，电荷灵敏度为 1 ～10^4pC/g。

（2）质量

在测量轻物体的振动时，加速度传感器的质量变得相当重要，因为附加的质量能够明显地改变测量点的振动值和频率。一般说来，加速度传感器的质量应不大于安装该传感器的零件质量的 1/10。

（3）动态范围

动态范围是指加速度传感器能够测量的振动值的范围。动态范围的下限是由连接电缆和前置放大器电流的噪声所决定的。其上限取决于加速度传感器的结构强度，一般的加速度传感器的动态范围上限为 $5\times10^4\sim10\times10^4$m/s^2。

表 1.2.2-1 为部分压电式加速度传感器的技术性能。

表 1.2.2-1　　压电式加速度传感器技术性能

型　号	电荷灵敏度 (pC/ms^{-2})	电压灵敏度 (mV/ms^{-2})	频率范围 (Hz)	质量 (g)	最高工作温度 (℃)	生 产 厂
YD-1		8 ～13	2～10 000	<40	常温	北京测振仪器厂
YD-8		0.8～1	2～1800	<2.6	常温	北京测振仪器厂
4371	1 ±2%	≈0.8	0.1～12 600	11	250	B&K公司
4384	1±2%	≈0.8	0.1～12 600	11	250	B&K公司
4391	1±2%	≈0.8	0.1～12 000	16	180	B&K公司
4370	10±2%	≈0.8	0.1～4 800	54	250	B&K公司
960	5		2～5 000		121	IRD公司
970	5		2～10 000		121	IRD公司

3)安装方法

加速度传感器必须牢固地与被监测机械相连。根据被监测机械的结构，工作条件以及监测方式等情况，可分别采用以下几种安装方法，如图 1.2.2-8 所示。

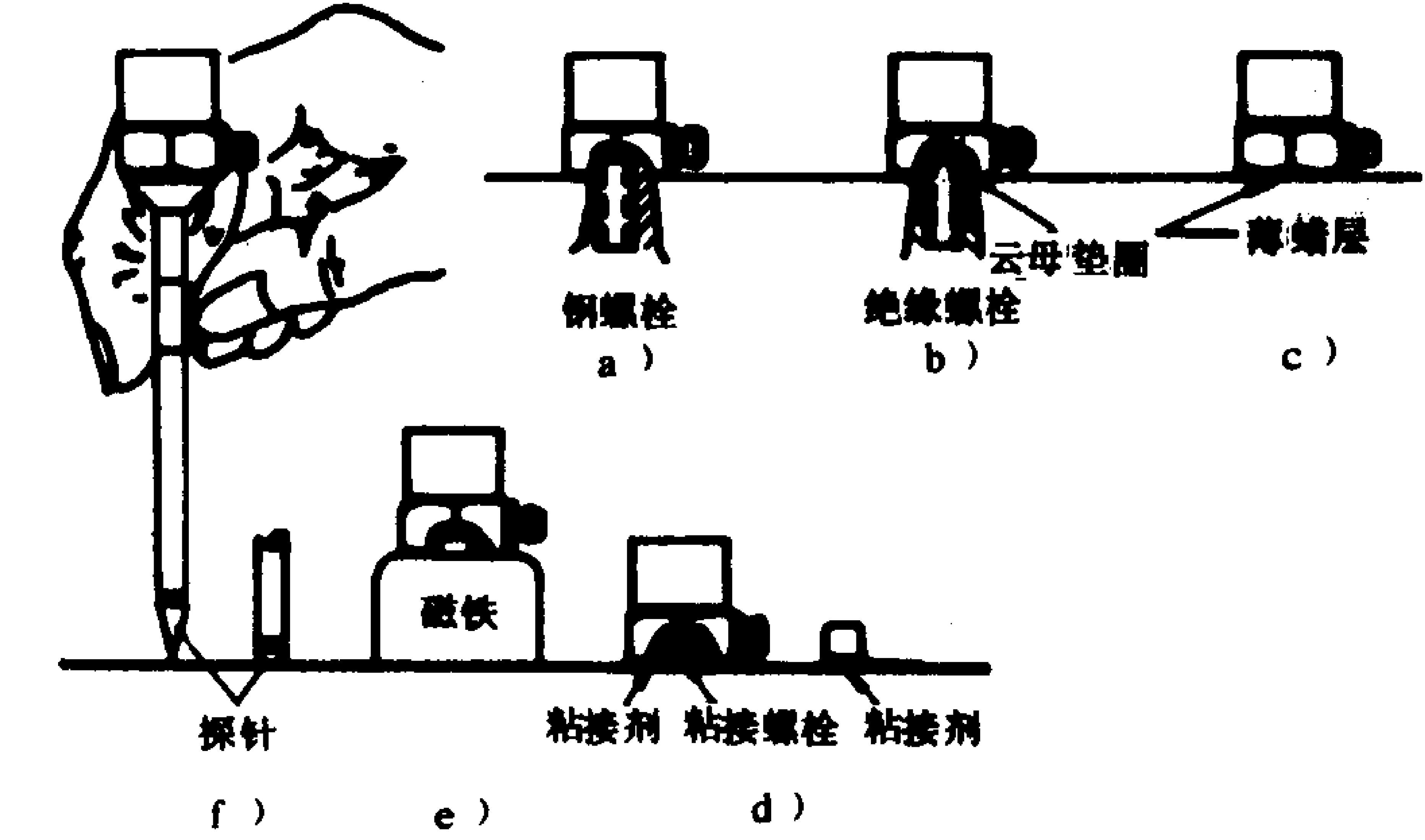


图 1.2.2-8　压电式加速度传感器的安装方法

（1）用钢制双头螺栓连接加速度传感器及被监测机械，机械表面应该平整，如图 1.2.2-8 a）所示。

（2）用带绝缘垫圈的双头螺栓连接加速度传感器与被监测机械，在两者接触表面间安装绝缘垫圈。这种方法用于需要电气绝缘的情况。它的连接效果与钢制双头螺栓相同，如图 1.2.2-8 b）所示。

(3)用蜂蜡将加速度传感器粘附在被监测机械的平整表面上。由于高温下蜂蜡变软而影响频率特性，因此这种方法只可在 40℃ 以下的温度条件下使用如图 1.2.2-8 c)。

(4)用粘结剂连接加速度传感器与被监测机械。这种方法用于在机械的测量点不能钻孔攻丝以安装双头螺栓的情况如图 1.2.2-8 d) 所示。

(5)在加速度传感器端部装设一个永久磁铁，可用以吸附于测量点处。此法使用方便，并且可使传感器与被测机械绝缘。由于使用闭合磁路，所以传感器不受磁铁的影响。它适用于 2 kHz 以下的频率，如图 1.2.2-8 e) 所示

(6)装在加速度传感器端部装有测头，可用手将它压在机械的测量点上。这种方法很简便，适用于测量点较多，测量部位狭窄等情况下。但在测头尖端和被测机械之间会有接触共振现象而造成较大误差。使用时，测头对测量点的压力和方向必须保持一致，而且仅限于在 1 kHz 以下的频率范围使用，如图 1.2.2-8 f)所示。

在安装加速度传感器时，必须注意环境因素对其性能的不良影响。

高温对压电式加速度计灵敏度的影响较大，在高温环境应使用专门设计制造的加速度传感器。

接地电流会通过被监测机械和测量设备的地线以及地坪形成的接地回路而在传感器中产生接地信号，这将增加分析的困难，用带绝缘垫圈双头螺栓可以避免这种现象的发生。

当电缆受到弯曲，扭曲或机械运动时，在其内部将会产生噪声现象，称为摩擦电噪声，因此在安装时，应尽可能用胶或带子将电缆固定住。

被监测机械的测量点的变形，会传入加速度传感器，因此在确定测量点时应该考虑其刚度因素。

3.2.2 速度传感器

测量振动速度值用的传感器，几乎都是磁电式传感器。它利用电磁感应原理来实现速度值的测定。

磁电式速度传感器有绝对式和相对式两种。图 1.2.2-9 为CD—1 型绝对式磁电式速度传感器的结构原理图。磁钢固定在壳体上，并且在它们之间的气隙形成强磁场。芯轴、线圈和阻尼环构成惯性系统的质量块，由两个弹簧片支持在壳体中。弹簧片的径向刚度很大，它可保持线圈的径向位置不变，弹簧片的轴向刚度很小，使惯性系统的固有频率很低。将传感器的壳体固定在被测对象上，当它承受沿其轴向的振动时，线圈与壳体发生相对运动，并切割存在于壳体与磁钢之间气隙中的磁力线，产生感应电势。感应电势值与相对速度成正比。相对速度可以看成是壳体的绝对速度。于是，传感器将输入量——振动的绝对速度转换成与之成正比的电压输出。此输出电压信号经过测量电路，进行电压放大和积分运算，可得出振动位移量；经过积分运算，又可得到振动的加速度量。

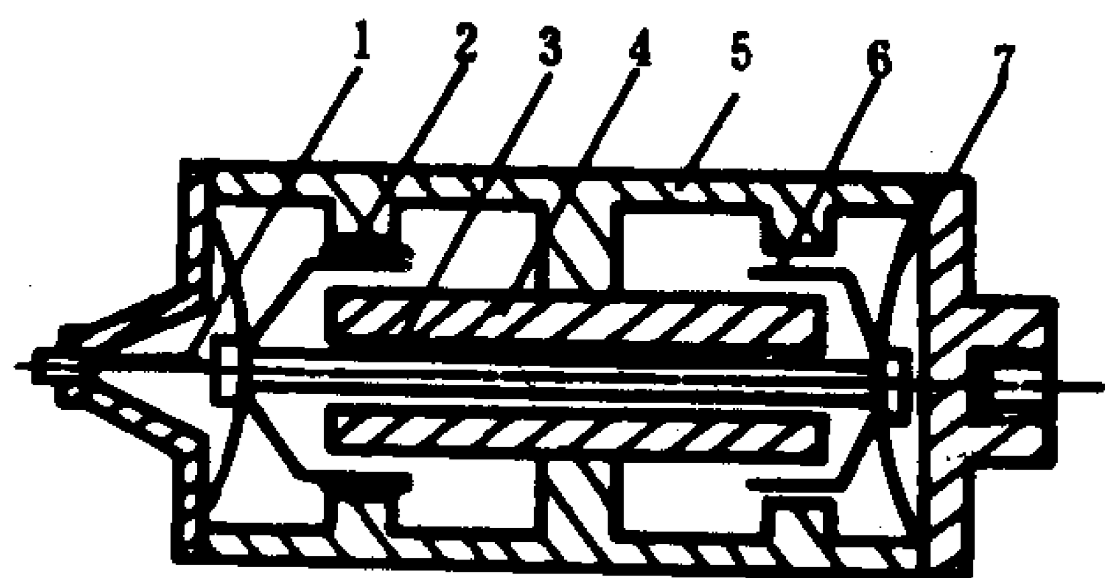


图 1.2.2-9 CD-1 型磁电式速度传感器

1-输出线；2-线圈；3-芯轴；4-磁钢；5-壳体；6-阻尼环；7-弹簧片

阻尼环是一个闭合铜环，它在磁场中移动时，能够产生其阻尼力与相对速度成正比的电磁阻尼。

速度传感器可用于测量垂直方向或水平方向的振动，它可以直接固定在被测机械的测量位置上，在测定平滑表面时，也可用手按在测量点上；还可以用球面顶

端测头进行测定。磁电式速度传感器应避免在高温和强磁场中使用，并应注意防潮。

磁电式速度传感器不需要外部电源，输出阻抗低，噪声小，易于操作；但是校正困难，结构较大而重，不适用于测量冲击振动。

表 1.2.2-2 为部分磁电式速度传感器的技术性能。

表 1.2.2-2　　磁电式速度传感器的技术性能

型　号	工作效率 (Hz)	速度灵敏度(单峰值) ($mV/cm \cdot s^{-1}$)	最大可测位移(单峰值) (mm)	最大可测加速度 (m/s^2)	质　量 (g)
CD-1	10～500	604	1	490	700
CD-2	2～500	302	1.5	980	800

3.2.3　位移传感器

监测高速旋转机械运行状态的有效方法是测定其旋转轴的径向和轴向位移。测定旋转轴振动位移用的非接触式传感器有电涡流式、电子光学式及其它形式。现简要介绍常用的电涡流式位移传感器。

如图 1.2.2-10 所示，为电涡流式位移传感器的原理。电源向一次励磁线圈P通入固定频率为 1MHz 的高频电流，由于电荷集肤效应，在振动体内便产生了电涡流ie。ie又会产生交变电磁场，仅作用于二次感应线圈上，使二次线圈 S 中感应产生输出电压e_0，它的值随二次感应线圈 S 与振动体A的距高，即位移d 而定。

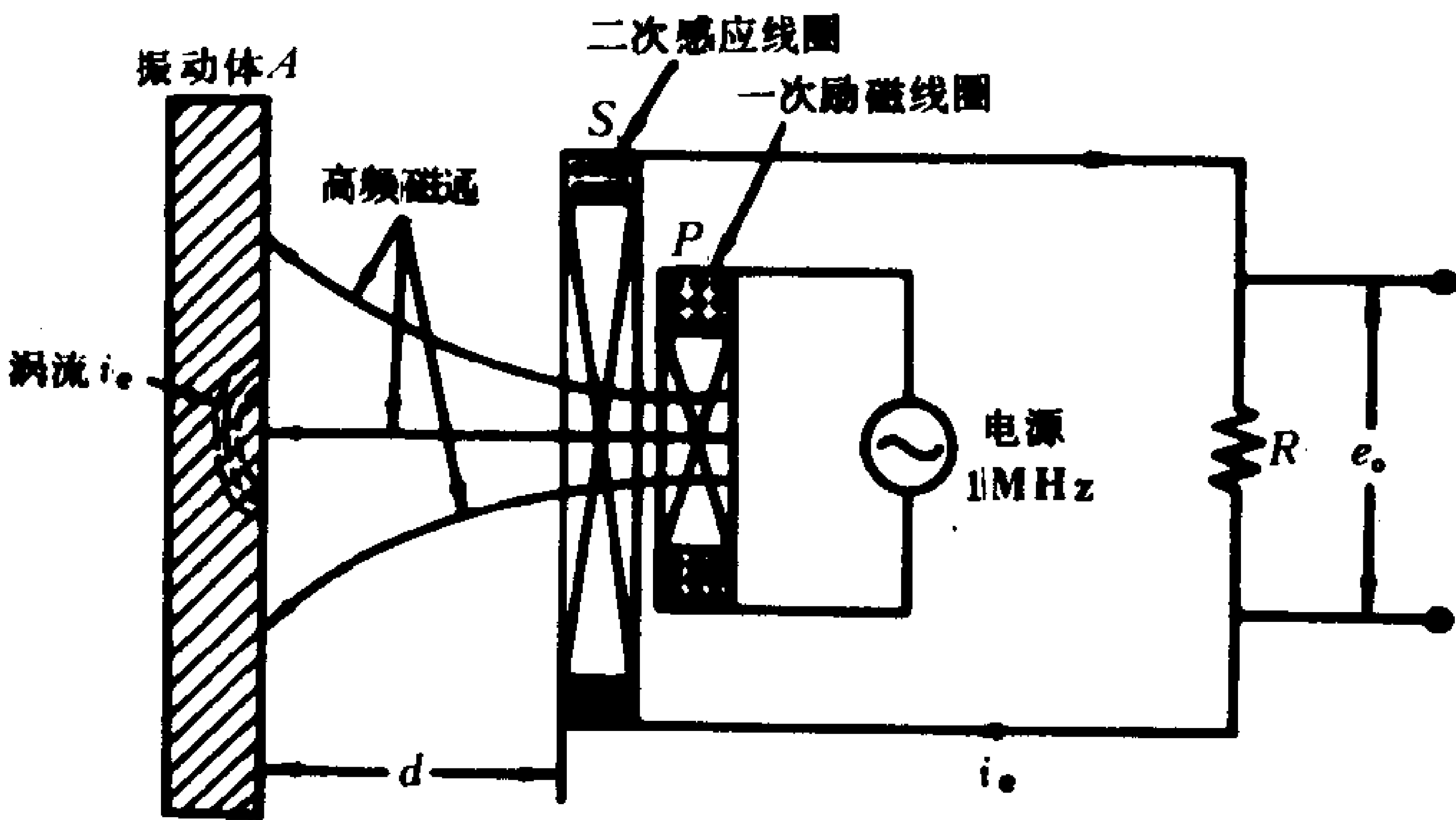


图 1.2.2-10　电涡流式位移传感器

由于振动体 A 的材质不同。涡流 ie 在传感器中的流动情况便不同，因而输出也不同。所以，必须按振动体 A 的不同材质重新校正。但是，由于它具有价格低廉、体积小、使用简便、灵敏度高等优点，所以在监测诊断中常被采用。

3.3　分析、记录仪器

3.3.1　前置放大器

压电式传感器本身的内阻抗很高，而输出的能量又很弱，因此，使用压电式传感器时，它的负载电阻值必须很大才能使测量误差减小。所以，与压电式传感器配合的测量电路通常是将传感器信号输入到高输入阻抗的前置放大器，然后方可进行一般的放大，检波，指示，或通过功率放大至记录器。

压电式传感器的前置放大器有两个作用：（1）把压电式传感器的高输入阻抗变成低阻抗输出；（2）将压电式传感器输出的弱信号放大。根据压电式传感器工作原理及其等效电路，它的输出可以是电压信号或电荷信号，因此，前置放大器有电压放大器和电荷放大器两种。前者的输出电压与输入电压（即传感器的输出电压）成正比；后者的输出电压与输入电荷成正比。

如图 1.2.2-11 所示，为电荷放大器测定系统和等效电路的应用。A 为放大器的放大率，按图中符号，输出电压e_0为：

$$e_0=\frac{S_q \cdot a \cdot A}{C_a+C_e+C_i-C_f(A-1)}$$

(1.2.2-8)

式中：S_q——传感器的电荷灵敏度，mV/G；

a——传感器获得的加速度。

此外，因为放大器的放大率$A\gg 1$，所以

$$e_0=\frac{S_q}{C_f}a \qquad (1.2.2\text{-}9)$$

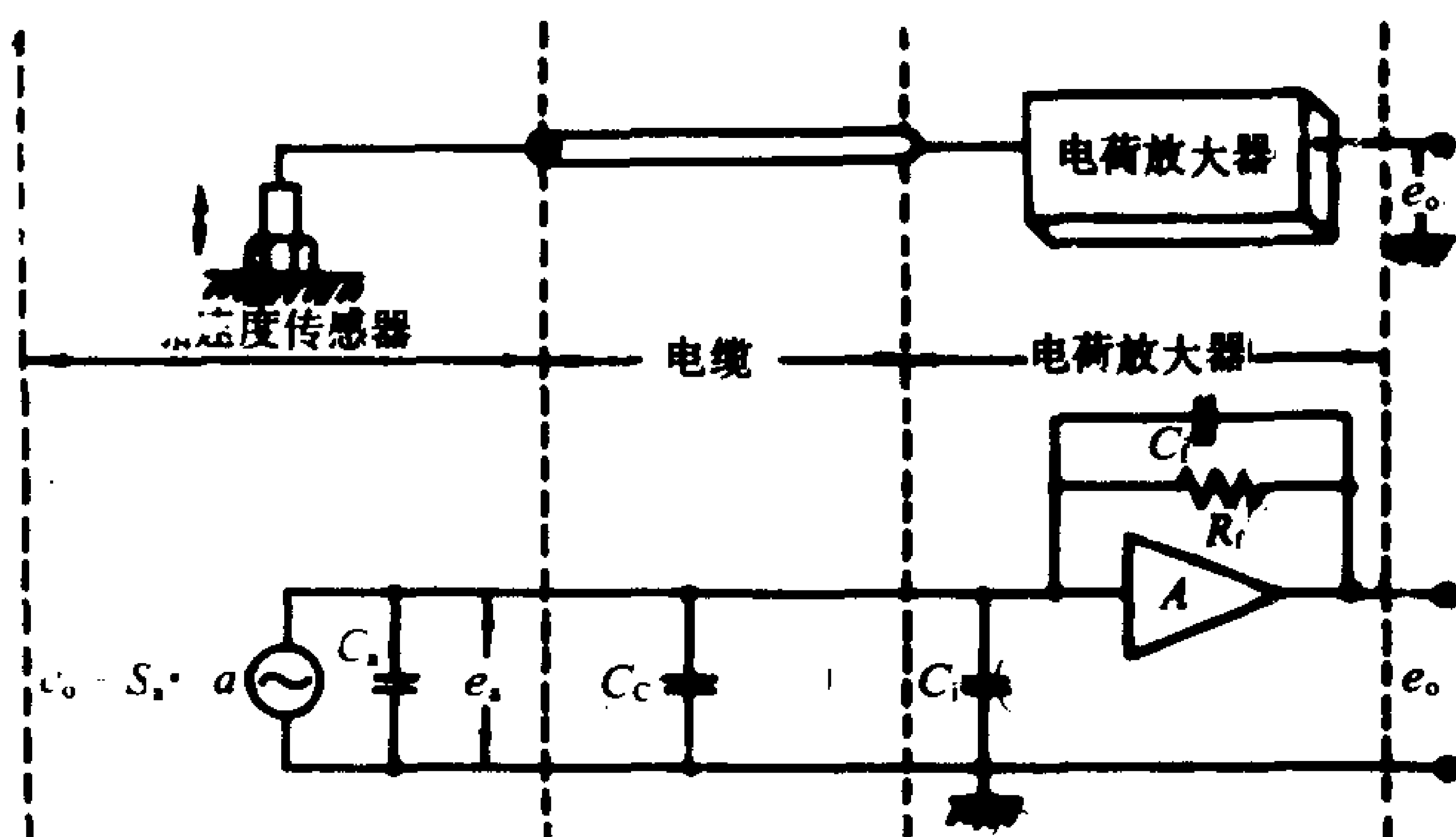


图 1.2.2-11　由电荷放大器组成的测定系统和等效电路

C_i-电荷放大器的输入电容，F；
G_f-电荷放大器的反馈电容，pF；
A-电荷放大器的电压放大率≫1；
R_f-反馈电阻，kΩ

电压放大器的特点是：结构简单、工作可靠、价格便宜，使输出电压受连接电缆电容的影响。电荷放大器的特点是：其灵敏度与电缆电容等无关，低频响应低。目前，大多数情况选用电荷放大器。

3.3.2　测振仪

测振仪是用来配接磁电式、压电式传感器，直接指示位移、速度或加速度等振动量的仪器。它也可以将信号输入到频谱分析仪作频谱分析。其主要部分有：积分微分电路、放大器、电压检波器和表头。测振仪只能获得振动的总强度(振级)而无法获得振动的其它方面信息，因而其使用范围有限。

国产测振仪主要有 GZ1 型和 GZ2型等。GZ1型测振仪是单线的，并且只能配接磁电式测振传感器。GZ2 型测振仪是 6 线的，可以配接磁电式测振传感器，也可以配接压电式测振传感器。GZ2型测振仪的工作频率范围为 2 ～100 kHz。振动量的测量范围取决于所配接传感器的灵敏度。仪器的系统误差不大于±10%。测点至仪器的距离不受限制。

图 1.2.2-12 为 GZ2型测振仪的电路方框图。它由微积分网络、前置放大器、衰减器、放大器、检波指示电路及稳压电源等部分组成。

磁电式速度传感器所产生的电压信号与振动速度成正比，将该信号直接放大便可显示振动速度值。据此，如欲获得位移信号，就必须进行积分运算。本仪器电路中所备的微积分网络，就是用来完成这种运算的。

一般传感器的输出电压不大，约为毫伏级，为了用电表指示或记录仪进行记录，必须将信号加以放大。由于测量范围较宽，常把放大器的放大倍数分成几档，由衰减器来进行分档。

放大后的电压信号，经过检波器推动指示电表，指示出信号的单峰有效值。仪器还可以将信号经放大后，由电压输出插座外接示波器或频率分析仪，最大输出电压为 4 V(有效值)；也可以由电流输出插座外接光线示波器，最大输出电流为 4 mA(交流)。

3.3.3　频谱分析仪

频谱分析法是振动测量中的重要方法之一。这种方法使我们能够了解被测量的振动信号的频谱含量，为正确选择测量方法和仪器提供重要的依据，它也是分析机械动力系统振动特

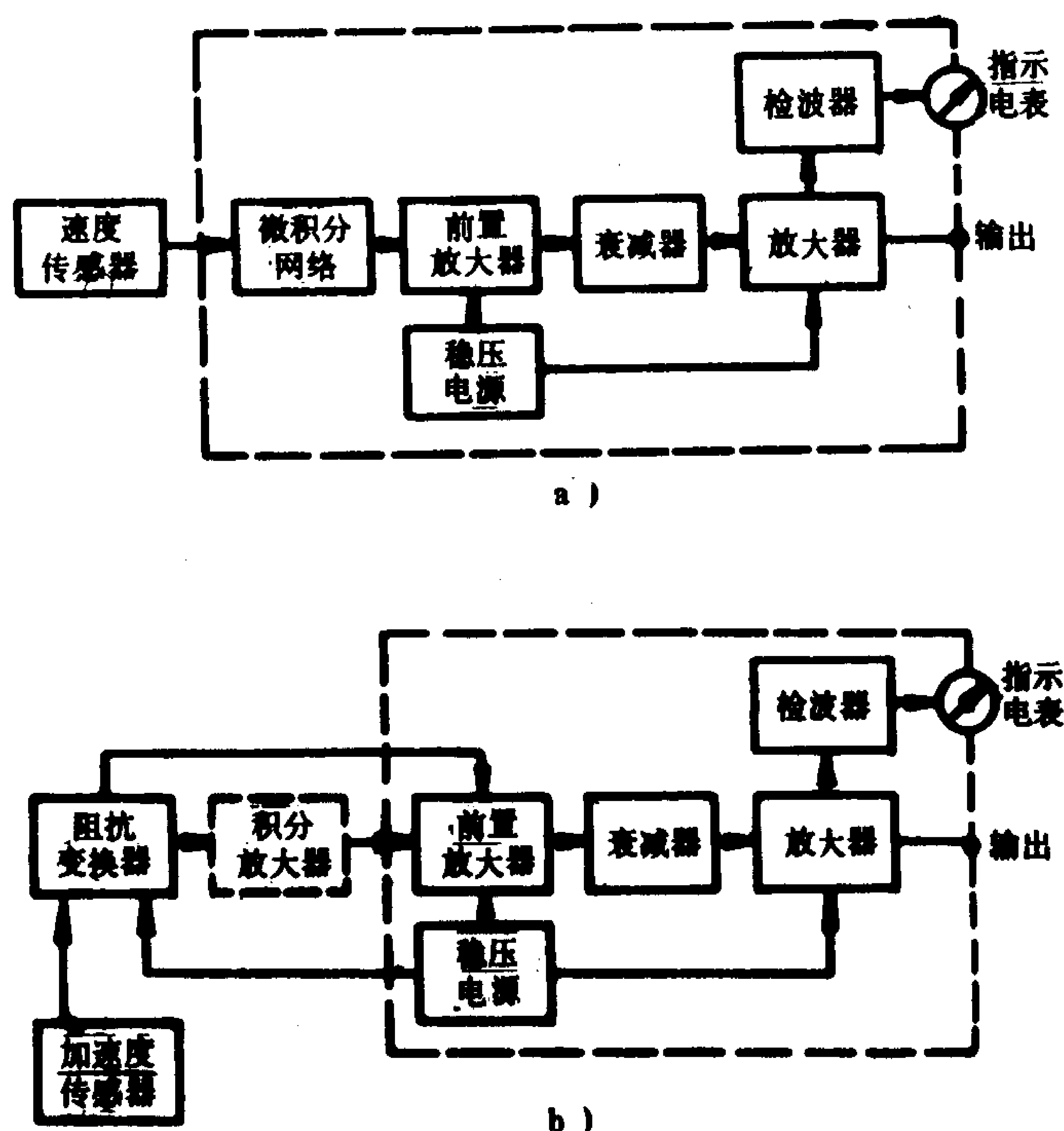


图 1.2.2-12 GZ2 型测振仪电路方框图

a)配接磁电式速度传感器；b)配接压电式加速度传感器

性的有效工具。根据系统的振动信号的频谱，可以判断振动的来源和系统的动力学特征，也可以进行故障的早期预报。

频谱分析法是基于数学上的傅里叶级数原理，亦即，任何周期振动都可分解成一系列简谐振动，其中一个是基波，它的角频率$\omega=\frac{2\pi}{T}$称为基波，而其余的简谐振动称为谐波，它们对应的频率为基波的整数倍。各谐波的幅值由傅里叶级数的系数确定。

周期振动的频谱图是一些离散直线，直线段高度代表谐波振动分量的幅值或有效值，离散直线段之间的间隔由振动量的周期确定。周期振动量的频谱图可用函数解析计算法、图形数值计算法和仪器分析法获得。目前，在振动试验和分析中，广泛采用仪器分析法。仪器分析具有速度快、精度高、分析率强、操作方便等优点。

随着电子技术和数字技术的发展，仪器分析法发展为两类方法，一类是模拟滤波方法。另一类是利用数字计算机通过快速傅里叶变换算法进行频谱分析。目前，常用的频率分析仪都是以这两种方法为基础的。频率分析仪种类很多，适用于不同的情况。可查阅有关的资料。

3.3.4 记录仪器

记录仪的功能是记录和显示被测振动和冲击随时间变化的曲线，或者是记录和显示被测振动和冲击的频谱图。

记录仪的种类很多．如示波仪、伺服记录仪、磁带记录仪和数字记录仪等。它们的工作原理各不相同，应用场合亦不尽一致。

1)光线示波仪

光线示波器又称为振动子示波器。由振动子、光学系统、记录纸传动装置、时标装置和其它附件组成。振动子是光线示波器的重要组成部件，不同大小的电流通过其线圈而改变指针与光线反射角的大小，并在纸带上以不同波形的曲线显示出来。

2)描笔式记录仪

描笔式记录仪能把输入电信号放大，然后推动记录笔，并在记录纸上描绘出信号幅度与时间的关系曲线，以提供直观分析及定量测试之用。

描笔式记录仪是一种磁电式记录仪，它由检流计、纸带传动机构、标记机构及放大器组

成。电动机通过变速机构和纸带驱动机构，使记录纸带运动；记录笔由检流计驱动，其笔尖的运动方向基本上与纸带运动方向垂直，以在纸带上绘出记录曲线。

描笔式记录仪所测信号的频带较窄，一般为 0 ～70 Hz，它对阶跃信号的响应性能较差，但使用简便。

3)伺服记录仪

(1)x—y记录仪

x—y记录仪，又称函数记录仪或x—y函数记录仪，是一种通用的自动平衡记录仪。它可以在直角坐标轴上自动描绘两个电量的函数关系$y=f(t)$。当在x轴向配有走纸机构时，记录仪还能自动描绘一个电量对时间的函数关系。在多笔记录仪中，则可同时描绘几个函数关系：$y_1=f_1(x)$，$y_2=f_2(x)$，$y_3=f_3(x)$，或$y_1=f_1(t)$，$y_2=f_2(t)$，$y_3=f_3(t)$，这样可便于相互对比和分析。

(2)自动平衡记录仪

它用来描绘被测量与时间的函数关系，其记录纸等速通过记录笔，纸的位移模拟时间间隔。

4)磁带记录仪

磁带记录仪的工作原理是将随时间变化的输入电信号（即经传感器转化为电信号的振动量)转化成记录磁带上的剩磁（磁感应强度）沿磁带长度方向上的变化；重放时，则相反。它可得到与记录时有相同变化的输出电信号。在其输出端可以连接示波器及频谱分析仪等，以进行波形显示或分析。

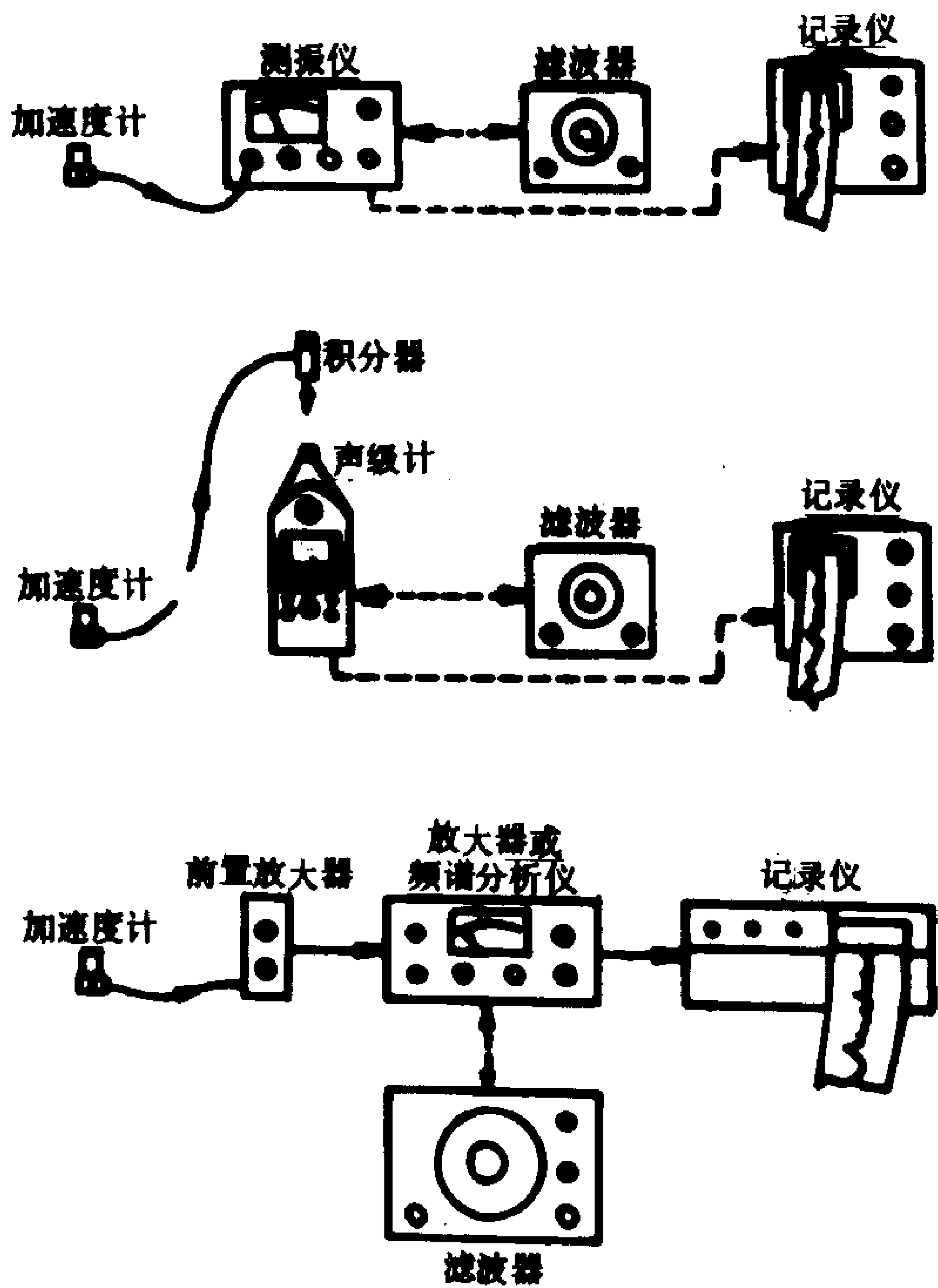


图 1.2.2-13 传感器、分析仪器及记录仪器的组合方式

磁带记录仪的优点是：频带宽、动态范围宽，信号可以长期保存并随时再现，磁带能反复多次使用。信号以电磁形式保存，便于与计算机连用，可显著提高数据处理精度和缩短数据处理时间。磁带记录仪有广泛的应用，已成为一种很重要的记录仪器。

5)数字记录仪

数字记录仪是一种新型的记录仪，它宜于记录爆炸、震动及冲击等各种瞬态现象及低频慢变化的信号。数字式记录仪是利用数字存储器寄存信号的仪器。在记录仪里，信号经过采样—保持，模—数转换转化成数字式离散时间序列，然后存放在存储器内，数字化离散时间序列信息可以直接从存储器内输出，或者经过数—模转换、低通滤波器恢复模拟信号输出。数字记录仪的特点是：输入量可以是模拟信号或数字信号；输出量也可以是模拟量或数字量；它是以数字形式贮存，记录信号频率较一般记录仪为宽。

表 1.2.2-3 为各种常用记录仪的技术性能，可供选用参考。

表 1.2.2-3

各种常用记录仪的技术性能

记录器名称		自动平衡记录仪（伺服记录仪）	X—Y记录仪（伺服记录仪）	检流计式笔录仪	光线示波器	磁带记录仪
概　述		记录器中精度较高的一种，记录幅度广，完全直线书写	在平面上记录两种物理量的关系	使用广，操作方便	使用广，频率响应好，多线化容易	灵活性大，可作为计算机输入存贮，频率响应好，多线化容易
主要用途		各种物理量的长时间记录	特性曲线自动记录	变化频率较低的现象同时记录	变化频率较高的现象同时记录	高低频现象暂态过程同时记录
记录单元名称		伺服机构	伺服机构	检流计	振　子	磁　头
记录方式		墨水笔，圆珠笔记录	墨水笔，圆珠笔记录	墨水笔，电笔，热电笔	直接感光显示，显影，定影显示	磁化现象隐式记录
主要参数	工作频带（最高）	1 Hz	满幅 1 s	30～100 Hz	5 kHz（最大 10 kHz）	40～80 kHz（最高 400 kHz）
	振幅精度	0.25%	0.25%	2%	2%	2～5%
	灵敏度	1～10 mV/满幅	10 mV/满幅	0.5～25 mm/mA	1.9×10⁵mm/mA · m	
	线　数	1～3	1～2	1～12	达 60	达 56
	记录带速度	2 cm/h～50 cm/min		1～25 cm/s	25 cm/min～200 cm/s	2.38～305 cm/s
	记录幅宽	150～250 mm	纵横 250 mm	40 mm	100 mm以上	
	输入阻抗	100 kΩ	100 kΩ	约 4 kΩ	10～200 Ω	100 kΩ左右

3.4 振动监测

3.4.1 概述

振动监测工作包括振动信号的采集测定，处理及机器故障的诊断等，在机械（特别是回转机械）工况监测与诊断中得到广泛应用。振动监测诊断可以在现场进行，或在现场采集信号，在实验室内用振动分析仪器分析。对于大型机械设备，还可以安装永久性的在线监测装置进行连续监测。振动测量仪器已经形成了系列，对一些机械或机械零件的振动特性已建立了标准图谱。

振动监测所需的各种传感器、分析仪器和记录仪器可以根据被监测机器的运行条件。监测要求和已有仪器的情况采取不同的组合方式如图 1.2.2-13 所示。

3.4.2 测量参数的选择

对于回转机械发生的振动，有位移、速度、加速度等 3 种参数可供测定。通过测定振动值来监测设备的劣化状态时，需要恰当地选用这 3 种参数。

通常，低频以位移或速度，中频以速度，高频以加速度分别作为其测定参数。频率越低则位移的测定灵敏度越高，频率高则加速度的测定灵敏度亦高。随劣化类别而定的测定参数见表 1.2.2-4。

表 1.2.2-4 **各种异常现象的测定参数**

测定参数	异常种类	举例
位移	位移量或活动量异常	加工机床的振动现象，旋转轴的摆动
速度	振动能量和疲劳异常	旋转机械的振动
加速度	冲击力等力的大小异常	轴承和齿轮的缺陷引起的振动

3.4.3 测量点的确定

振动点的确定对于获取被监测机械的真实振动状况十分重要，它真接影响到诊断的准确程度。机械的结构、工作条件、故障损伤形式不同，其振动频率各异，因此，对于振动测量点的确定不可能有一个通用的规则。以下，提出确定测量点时的一些注意事项：

1)测量振动参数值有接触式和非接触式两种，接触式用于测量加速度值和速度值。传感器装在机械的静止零件上，非接触式用于测量位移值。传感器与机械的运动零件保持一定的距离；

2)任何一个振动值在空间可以分成垂直、水平及轴向三个不同方向的振动分量，不同机械不同故障的振动分量亦不相同，因此，测量点应尽可能按 3 个方向布置；

3)测量点应靠近被监测的零件，保证该零件的振动值能为传感器所接收；

4)测量点的表面应平整并有足够的安装空间；

5)测量点确定后，就不再变动；保证每次均在同一点测定，否则会使振动值的离散度变大，为此可以在测量点上作出记号；

6)安装传感器的夹具应有足够的刚度；

7)测量点附近环境对测量值的影响要小。

3.4.4 诊断方法及标准

振动监测诊断通常可分为简易诊断和精密诊断两种方法。简易诊断方法是定期测量并记录振动参数值，绘制参数的趋势图，对照该机械的振动标准值，确定该机械的工况及劣化倾

向。简易诊断由机械操作人员在现场进行，使用的仪器为便携式仪器。精密诊断方法是应用传感器在现场采集振动参数值的信号，用记录仪器（如磁带记录仪）收集保存这些参数信号，然后，将信号输入各种频谱分析仪从频率、相位、振幅、时间等各方面进行分析，以确定异常振动的各种性质从而诊断故障的部位、原因与危害程度等等。精密诊断通常由专业人员应用复杂精密的仪器来进行。

简易诊断的作用是判断机械工况的正常与否，它可以借 3 种判断标准来实现：

1）绝对判断标准　是指一定类型的机械在一定的工作条件下所产生的各种振动参数值范围，这个范围可分为优、良、正常、不正常。表 1.2.2-5 为 ISO 2372 和 VDI 2056 振动标准。绝对判断标准最适合现场使用。但是迄今还没有通用的绝对判断标准，因此对于许多机械来说有必要根据其工作情况自行制定标准以供使用。

表 1.2.2-5　　振动标准(ISO 2372, VDI 2056)

速度有效值，mm/s	I 级	II 级	III 级	IV 级
28~45	不正常	不正常	不正常	不正常
18~28	不正常	不正常	不正常	不正常
11.2~18	不正常	不正常	不正常	正　常
7.1~11.2	不正常	不正常	正　常	正　常
4.5~7.1	不正常	正　常	正　常	良
2.8~4.5	正常	正　常	良	良
1.8~2.8	正常	良	良	优
1.12~1.8	良	良	优	优
0.71~1.12	良	优	优	优
0.45~0.71	优	优	优	优
0.28~0.45	优	优	优	优
0.18~0.28	优	优	优	优

I 级，功率小于 15 kW的小型机器。II 级，功率为 15～75 kW的中型机器或安装在独立基础上的功率小于 300 kW 的机器。III 级，安装在坚固重型基础上的大型机器，基础的自然频率大于机器速度。IV 级，速度大于基础自然频率的大型机器（如汽轮机）。

2）相对判断标准　是指对机械的同一部位定期测定其振动参数值，并按运行时间先后进行比较，以正常情况下的参数值为原始值，根据实测值与该值的倍数比来进行判断的方法。

对于低频振动，通常都将标准定为：实测值达到正常值的 1.5～2 倍时为注意区域，约 4 倍时为异常值。对于高频振动，根据机件（零件）的强制劣化实验结果，将正常值的 3 倍定为注意区域，6 倍左右应为异常区域。图 1.2.2-14 为相对判断标准的实例。

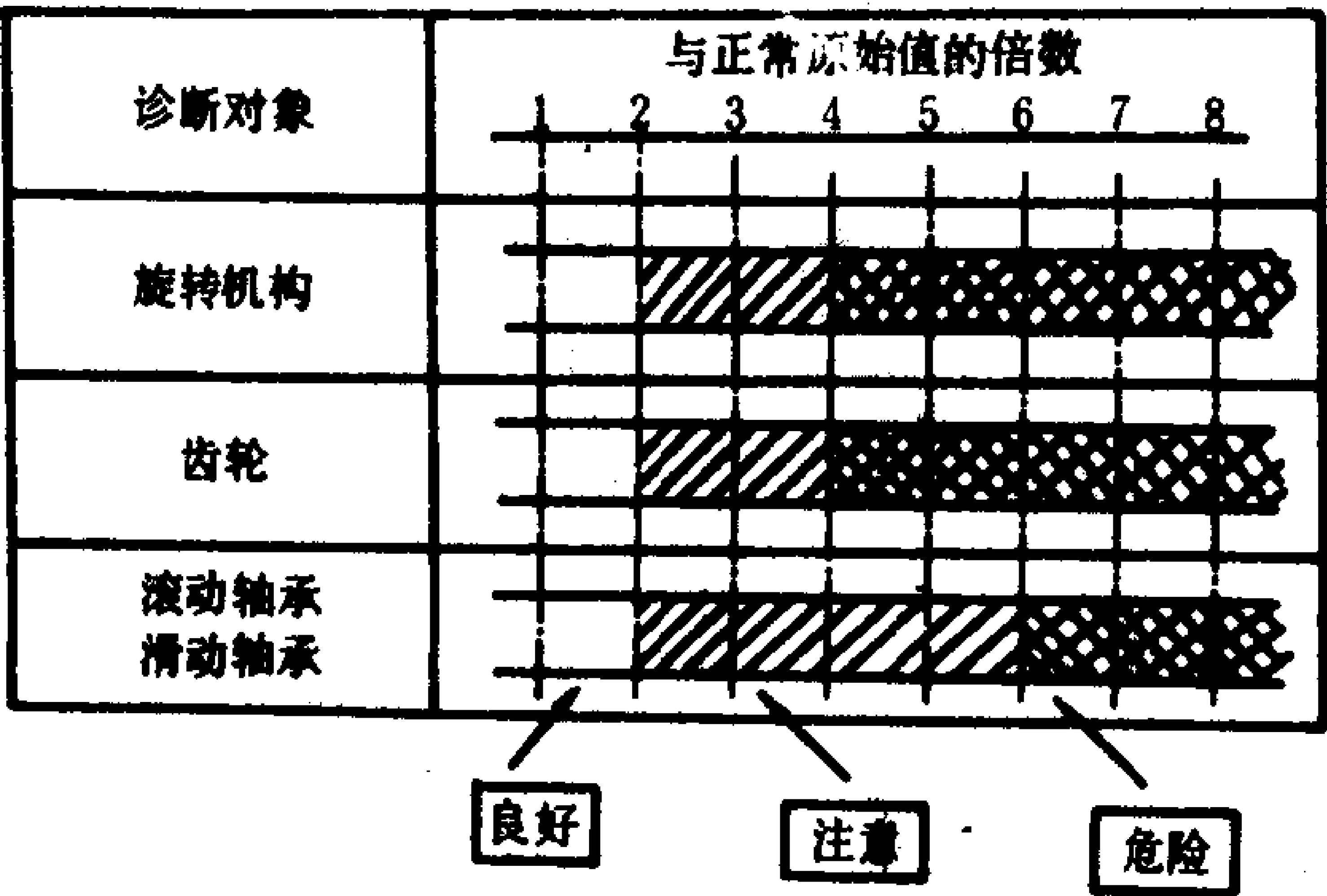


图 1.2.2-14　相对判断标准实例

3）类比判断标准　是指数台同样规格的设备在相同条件下运行时，通过对各台设备的同一部位进行测定和相互比较来掌握异

常程度的方法。

当振动值不正常时，通过谱率分析可以查明异常现象的部位和情况。表 1.2.2-6 为振动频率与异常工况的关系。

表 1.2.2-6　　振动频率与异常工况的关系

零　件	故　障	振动频率	振动形式
转　子	不平衡	f_0	径　向
轴	弯曲	f_0、$2f_0$、$3f_0$	径　向
轴	不圆度	$2f_0$	径　向
联轴器	不对中	f_0，$2f_0$　$3f_0$	轴　向
联轴器	损坏	主要为f_0，(不包括齿形联轴器和液压联轴器)	径　向
滚动轴承	内圈损坏	$\frac{Z}{2}(1+\frac{d}{D}\cos\alpha)f_0=f_{ir}$	径　向
滚动轴承	外圈损坏	$\frac{Z}{2}(1-\frac{d}{D}\cos\alpha)f_0=f_{or}$	径　向
滚动轴承	滚珠和滚柱损坏	$\frac{D}{d}\left[1-\left(\frac{d}{D}\right)^2\cos^2\alpha\right]f_0=f_b$	径　向
滑动轴承	间隙过大	f_0	径　向
滑动轴承	润滑不良	f_0	径　向
滑动轴承	轴瓦与轴承座松动	$\frac{1}{2}f_0$，$\frac{1}{3}f_0$	径　向
滑动轴承	油膜搅动	$<\frac{1}{2}f_0$(42%至 48%)	径　向
机　座	安装不稳	f_0	轴　向
机　座	刚性不足	f_0	径　向
齿　轮	轮齿损坏	Z'，f_0	径　向

注：f_0——转速频率，Hz；Z——滚动轴承的滚珠或滚柱数量。d——滚动轴承的滚珠或滚柱直径。D——滚动轴承的节圆直径。α——滚动轴承的接触角。Z——损坏的轮齿齿数。

4　光谱分析

4.1　概述

光谱分析是利用原子的发射和吸收光谱进行物质的化学组成及含量分析的方法。光谱油料分析是通过光谱分析法分析机械润滑油中磨损微粒的成份和数量，从摩擦学角度判断机械磨损状况并预报故障的部位及原因。这是一种有效的机械故障诊断方法，已经应用于船舶、机车及航空发动机的工况监测及故障诊断。

当以火焰、电弧、电火花或其它方法灼热气体或蒸汽时，它就能发出不同波长(单位：Å)的光线，利用三棱镜对这些光线折射率的不同，可以把它们分成一系列按波长长短的次序排列的线条，这些线条称为谱线，线状光谱是这些谱线的总称。原子光谱都是线状光谱。每种元素都具有特定波长的光谱（表 1.2.2-7)。运用这一基本原理就可以进行元素的原子光谱分析。常用的光谱分析方法有原子吸收光谱分析和发射光谱分析两种。

表 1.2.2-7　　部分元素的特征谱线波长

元　　素	波　　长(Å)
铜	32[illegible]7
铁	3270
铬	3579
镍	3415
铅	2833
锡	2354
钠	5890
铝	3092
硅	2516
镁	2852
银	3281

4.2　原子吸收光谱分析法

原子吸收光谱分析法，通常又称原子吸收分光光度法，简称原子吸收法。

原子吸收光谱分析法是原子对特征光吸收的一种相对测量方法。它的基本原理是：以一束特定的入射光强I_0，投射至被测元素的基态原子蒸汽，与入射光谱线相同的被测元素的基态原子将吸收一部分入射的特征光，未被吸收的部分特征光则透射过去。被测元素原子蒸汽浓度C越大，光的吸收量越多，其透射量越小。也就是说试样中被测元素的浓度C，入射光强I_0和透射光强 I 三者之间存在一定的关系。根据这种关系，并将已知被测元素浓度的标准溶液对光的吸收与试样对光的吸收进行比较，就可以求出试样中被测元素的含量。

原子吸收分析主要分为两类：一类由火焰将试样分解成自由原子，称为火焰原子吸收分析；另一类依靠电加热的石墨管将试样气化及分解，称为石墨炉无火焰原子吸收分析。

原子吸收光谱分析法的优点是：灵敏度高、选择性高、重视性好、测定元素范围广、操作简便、分析速度快、仪器设备简单，结合现代电子技术，使得在操作可靠性方面和所测浓度的直接数字显示方面，都达到较高的水平。

原子吸收光谱分析法也存在一些问题：测定难溶元素的灵敏度还不够好；每测定一个元素需要一个特定元素的空心阴极灯光源；对较大尺寸的杂质不能很好地原子化。

原子吸收光谱分析法是通过原子吸收分光光度计（又称原子吸收光谱仪）来实现的。

原子吸收光谱分析仪由空心阴极灯，原子化器、光学系统和放大，记录及显示等检测系统组成（图 1.2.2-15）。

空心阴极灯是原子吸收光谱仪的光源，其阴极为空心杯形，由待测元素或由其合金制成。所以测定某元素的含量就要用阴极为该元素的灯，即一个元素一个灯。灯管熔封后，充入低压氖或氩气，成为一种特殊形式的辉光放电管。在两极加电压导通之后，氖或氩气电离，碰撞阴极内壁溅射出待测元素的原子，这些原子再与氖或氩电子、离子等碰撞被激发放光，辐射出待测元素的特征谱线(元素共振线)。谱线通过火焰，

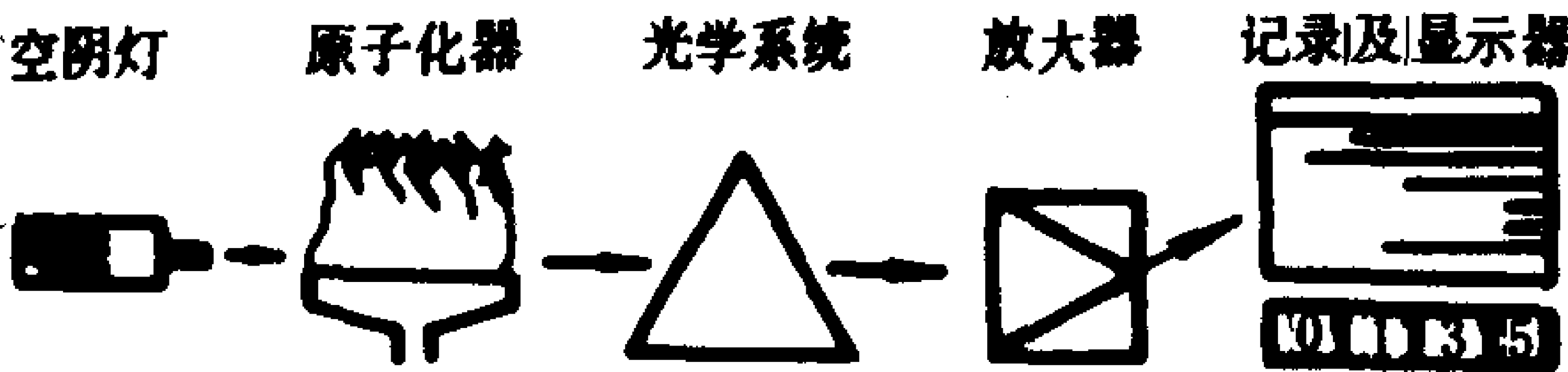


图 1.2.2-15　原子吸收光谱仪示意图

被待测原子吸收，产生吸收信号。

将试样变为原子气（自由原子蒸汽）的方法既可以用喷雾燃烧灯，也可以利用特殊的高温炉气化样品，前者称火焰原子化器(燃气为乙炔一空气或氧化亚氮一乙炔)，后者如石墨炉为无火焰原子化器。它们的结构和分析结果各有特点，喷雾火焰原子化器结构简单，分析结果的精密度良好，而无火焰原子化器的绝对灵敏度高，重现性差，结构复杂。目前，使用较多的是火焰原子化器。

在原子吸收光谱分析仪中，光学系统的作用就是将光源发出的光引导并会聚通过原子化器参予吸收，并通过单色器把被测谱线和其它谱线分开，以便进行测定。

光学系统分为两大部分，即：分光系统与外光路系统。分光系统又称内光路系统和单色器，它的作用是将由空心阴极灯所发射的谱线中分离出单一的原子谱线。实际上，它是一种可调滤光器，能让指定的窄带谱线透过而射向检测器，并阻止窄带之外的其它波长的谱线通过。外光路系统，又称照明系统，它的作用是收集光源所发出的光束，引导光束通过原子化器，并将其导入单色器。

光源发出的光通过火焰被吸收一部分之后，余下部分经光栅单色器分光将待测谱线发出的信号输入到光电倍增管，变成电信号，最后在表头及数字显示器或记录仪上显示出来。现在多数仪器具备对数转换档，可将与透过率成正比的光信号，经过对数转换成与吸收光读数成线性关系，从而可将读数调节成浓度值。

4.3 发射光谱分析

原子发射光谱分析是根据试样物质中不同原子的能级跃迁所产生的不同光谱来研究该物质的化学组成。原子发射光谱分析过程是将被分析的试样引入激发装置中，这个激发装置可以提供充足的能量使固态试样变为气态并将处于基态的原子激发至高能态。处于激发态的原子不稳定并要跃迁至基态或低能态，于是发射出谱线，根据谱线的波长及强度进行试样成分的定性和定量分析。

图 1.2.2-16 为发射光谱仪示意图。仪器由激发装置，摄谱仪和显示记录装置组成。激发装置的主要部件是光源，它能产生激发能源，常用的激发能源有火焰。交直流电弧、高低压电火花等。原子受激后，发出不同波长的辐射光线，光线从入口狭缝处进入摄谱仪而射至光栅上，光线在光栅上衍射色散成不同波长的单色光，这些单色光分别沿不同方向反射经过出口狭缝照射到光电倍增管上，使光强信号变为电信号，电信号输入显示记录装置经过处理后打印成数字或直接读出。发射光谱分析法可以快速测定多种元素的含量，但是仪器设备昂贵。

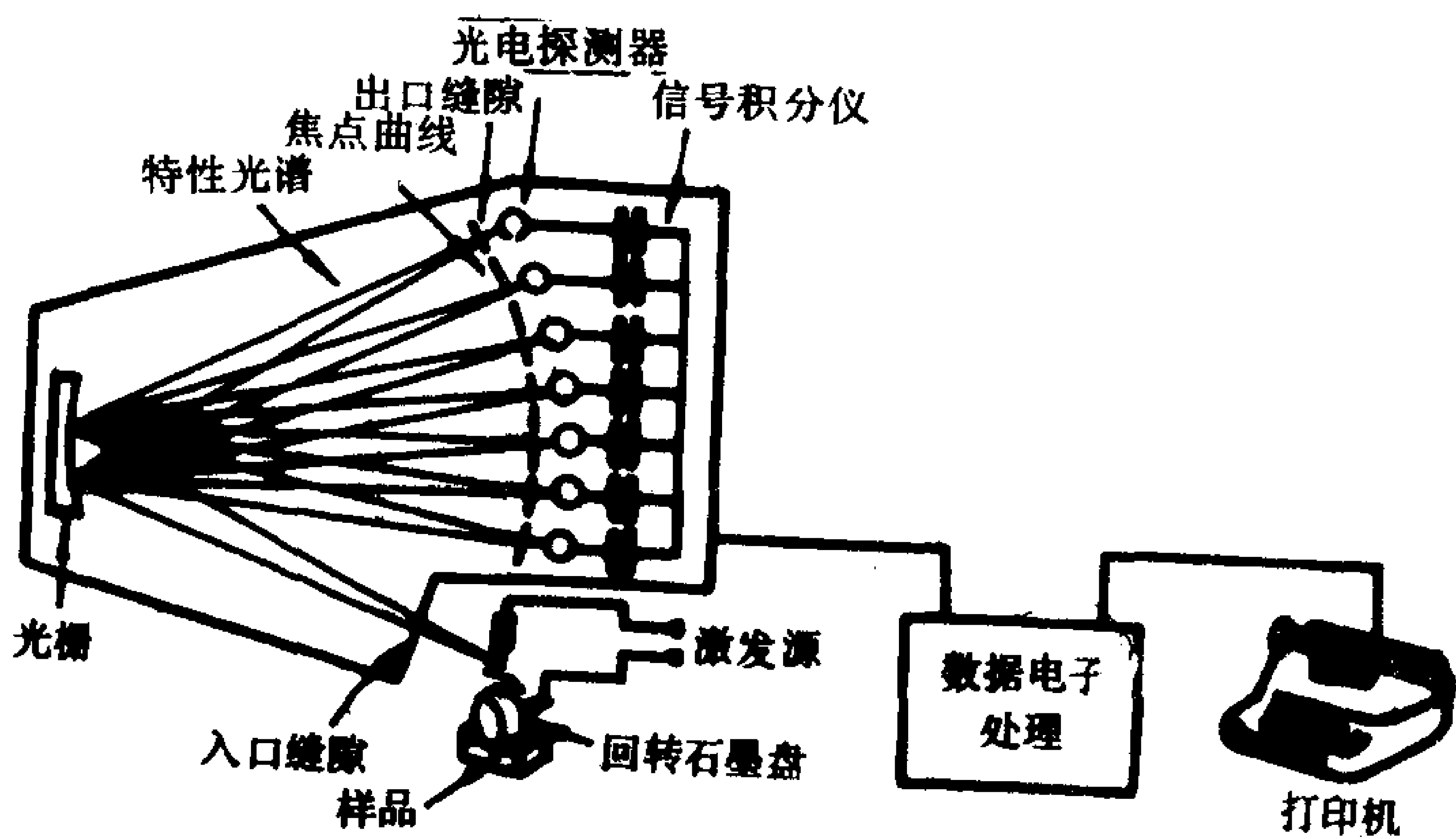


图 1.2.2-16 发射光谱仪示意图

4.4 光谱油料分析

光谱油料分析是对机械的润滑油进行光谱分析，按照分析结果来判断该机械的用油润滑的零件的磨损状况并预报故障，整个分析工作包括取样，光谱分析，数据分析及故障诊断三个阶段。

4.4.1 取样

油样的采集对分析的准确程度有直接的影响，取样应在机械运转时或停机不久后进行。取样可通过取样阀门，真空抽样或重力流动等方法进行。取样时，应记录取样日期，机械运行时数，润滑油使用时数及其它有关机械工作状态等情况。

4.4.2 光谱分析

按规定的操作规程对油样进行预处理和光谱分析。

4.4.3 数据分析及故障诊断

在通常情况下，润滑油中元素浓度值的高低表示含有该元素的零件磨耗量的大小；元素浓度值的大小或变化趋势可以作为判断故障的主要依据。对于各种机械，根据大量试验数据，经过统计分析和对照验证，制定各元素浓度的最大允许值，作为判断磨损状况的依据。表1.2.2-8为美国MOBIL公司对一些柴油机润滑油中部分元素含量的允许值，表1.2.2-9为美国卡特彼勒公司D 399 型柴油机润滑油中元素含量标准，表 1.2.2-10 为日本小松制作所机械产品的油样元素含量标准。

表 1.2.2-8　　柴油机中润滑油部分元素含量允许值 (ppm)

元素＼机型	GM-EMD 645,567,278	Fairbanks Morse	GM 71	GM 92	Cummins	其它机型
硅	11~15	11~15	16~20	16~20	16~20	16~25
铁	71~100	71~100	71~125	81~100	51~70	51~125
铝	10~15	31~50	8~15	8 ~15	11~15	11~20
铜	31~35	51~70	11~20	11~20	21~45	16~45
铅	31~35	51~70	16~25	16~20	21~40	21~40
锡	6 ~15	6 ~15	6 ~15	6 ~15	6 ~15	6 ~15
铬	11~20	16~25	11~15	11~15	11~15	11~20
银	2					

表 1.2.2-9　　D 399 型柴油机润滑油中元素含量标准(ppm)

元素＼数值	正　常	需报告	不正常	警　告
铜	<6	6~9	10~12	
铁	<20	20~30	31~40	>40
铬	<2	2~6	7~10	>10
铝	<6	6~9	10~12	>12
铅	<25	25~40	41~75	>75
硅	<15	15~23	20~30	>30

表 1.2.2-10　　小松制作所机械产品的油样元素含量标准(ppm)

元素＼数值＼部位	发动机润滑油			液压工作油		
	正常	警告	异常	正常	警告	异常
铁	45	90		15	45	
铜	15	45		10	30	
铬	5	15		3	5	
铝	8	16		10	30	
硅	25	80		20	40	
铅	20	40				

5　铁谱技术

铁谱技术是利用高梯度强磁场将磨损微粒从润滑剂中分离出来，并进行定性和定量分析的技术。铁谱技术可以观察磨粒的形貌，大小，分析其成分以及测定它的浓度；而且，铁谱技术能沉积的磨粒的尺寸范围为 2～100 μm，比光谱分析所能分析的微粒尺寸大得多。最初，铁谱技术应用于观察磨粒的形貌，分析磨损状态和研究磨损机理。由于它还具有可以不停机取样和不需要安装任何传感元件等优点，以后，它又应用于机械设备的工况监测和故障诊断。目前，国外已有一些国家将它应用于燃气轮机、工程机械、液压系统、齿轮箱及柴油机的工况监测，国内亦已经开始研究和应用。现在，铁谱技术还应用于润滑剂的评定、新机器及其部件设计的评估以及生物医学工程中。

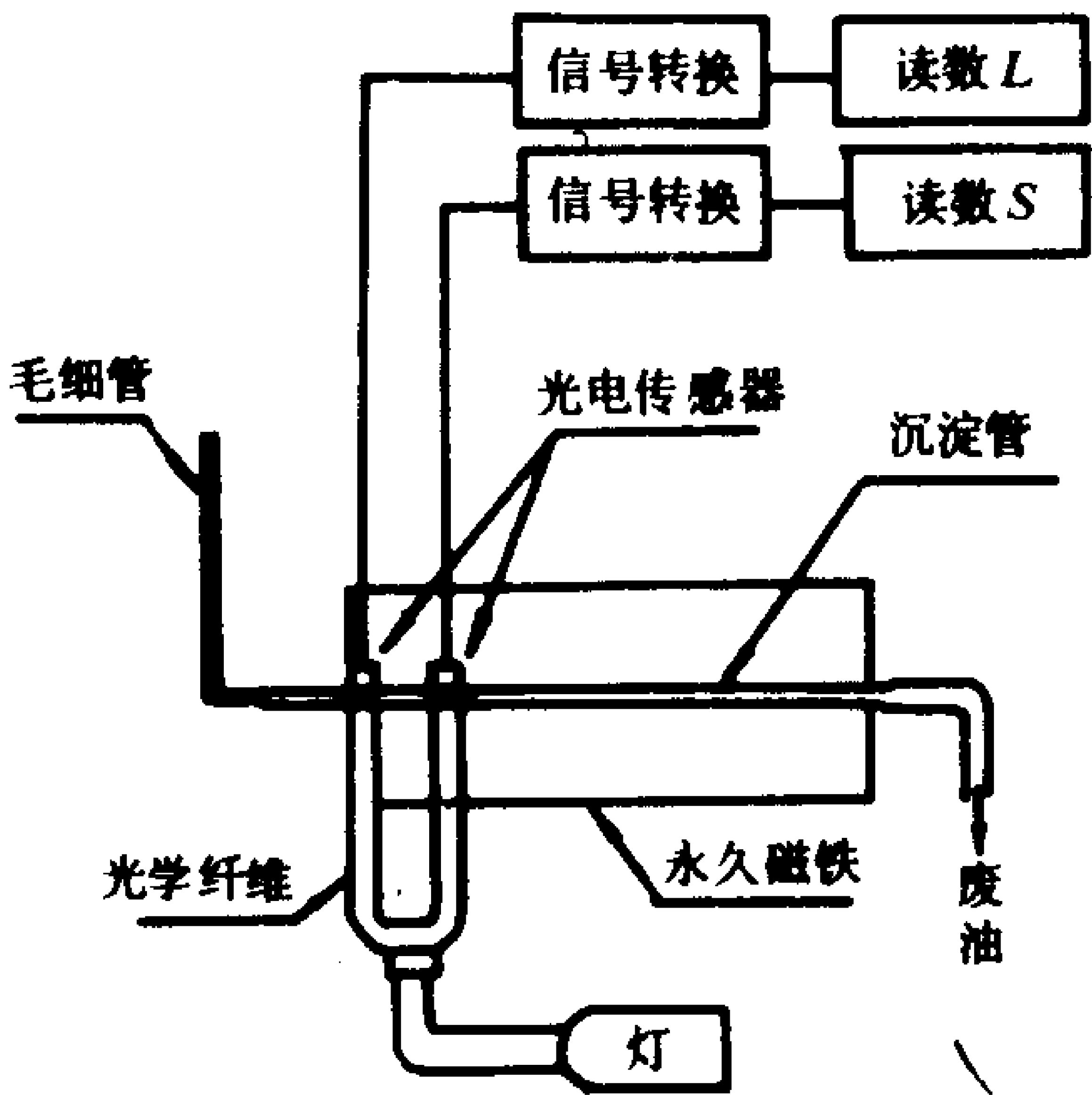


图 1.2.2-17　直读铁谱仪工作原理图

5.1　铁谱仪器

5.1.1　直读铁谱仪

图 1.2.2-17 是直读铁谱仪的工作原理图。玻璃沉淀管装在倾斜的永久磁铁上方，由于虹吸作用，油样经过毛细管缓慢地流过沉淀管然后流出。油样在沉淀管内时，由于永久磁铁的作用，使油样中的磨粒沉积在管的内壁。两束相距 5 mm的光线通过沉淀管，第一道光束的位置接近沉淀管的入口端，大微粒(> 5 μm)和部分小微粒沉淀在这个位置。第二道光束通过的位置是较小微粒(1～2 μm)沉积之处。光强的衰减量反映出这两个位置处磨粒的数量。光量经过转换和放大

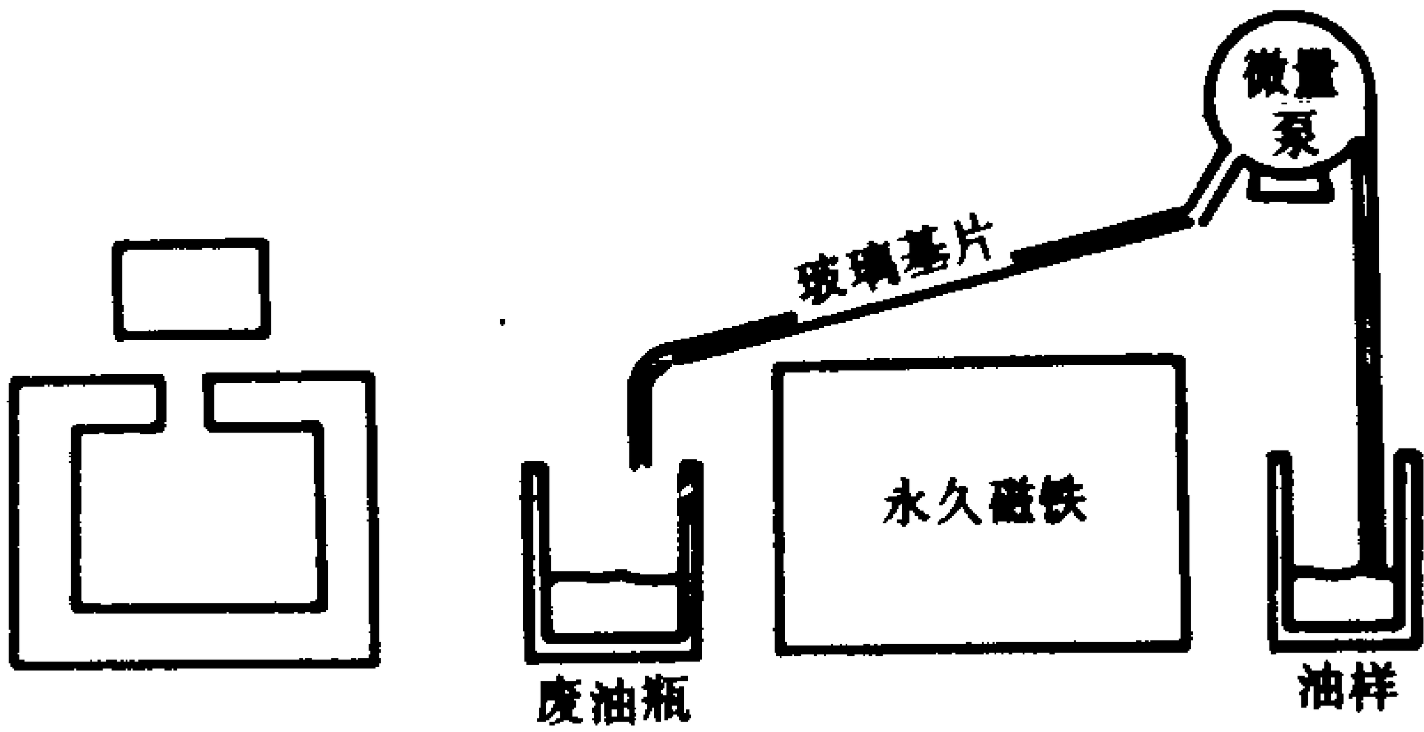


图 1.2.2-18　分析式铁谱仪工作原理图

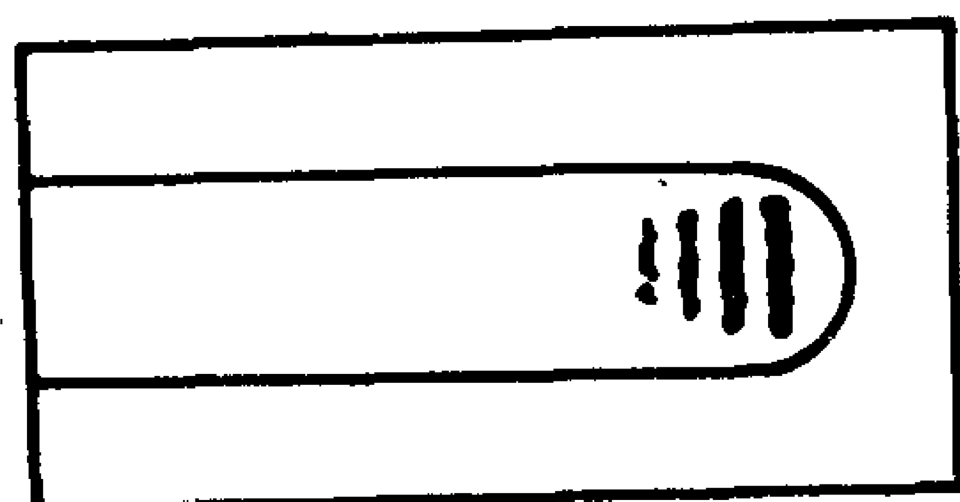


图 1.2.2-19 铁谱片

然后用数字显示出来，大微粒读数值用"D_L"或"L"表示。小微粒读数值用"D_S"或"S"表示。直读铁谱仪操作简单、迅速，而且可以得出直观的读数结论，适合在现场条件下使用。

直读式铁谱仪在国内外均有生产；国内产品的型号是：北京科学仪器厂的ZTP-1型，重庆光学仪器厂的TPD-1型和TPD-1A型；国外型号是：美国SOHIO公司的7065-5(DR II)型。

5.1.2 分析式铁谱仪

如图 1.2.2-18 所示，为分析式铁谱仪的工作原理图。分析式铁谱仪由永久磁铁及微量泵等组成。在永久磁铁的上方倾斜地安放一片玻璃基片。微量泵的滚轮外缘装有一根专用的细管，细管的一端靠近玻璃基片上方，另一端插入装有油样的试管中，启动微量泵，使油样以15～30 ml/h的流速经过细管，流经玻璃基片，然后从与玻璃基片下方搭接的排油管流入废油瓶。在玻璃基片上刻划有憎油的U形槽，油样可以在U形槽内沿垂直于磁铁磁力线的方向由上向下流动。由于磁铁的磁场作用，使油样中的磨粒沉积在玻璃基片上，然后再用溶剂冲洗去残油，使磨粒牢固地粘附在玻璃基片上，于是制成了铁谱片，如图 1.2.2-19 所示。

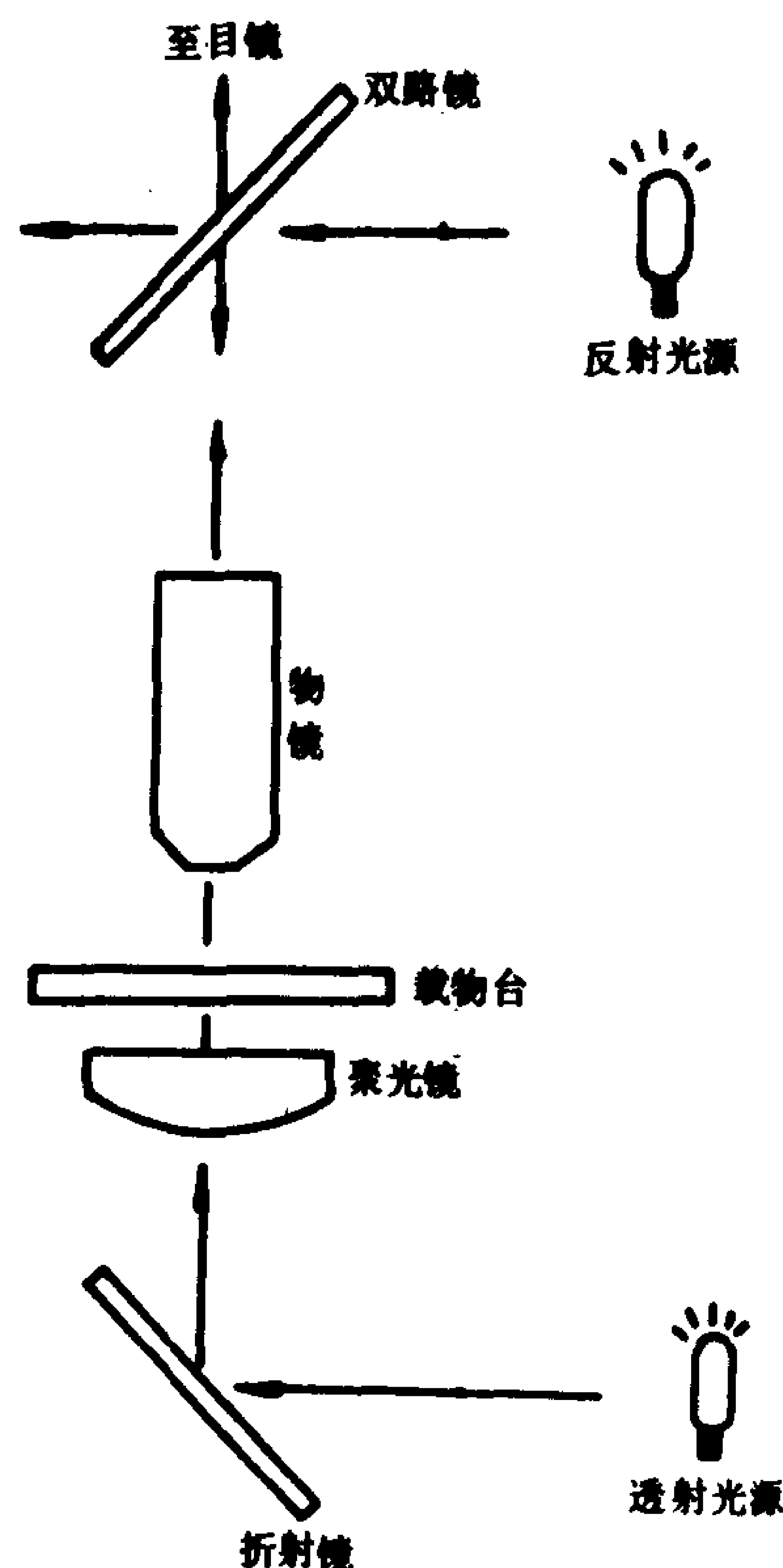


图 1.2.2-20 铁谱显微镜光路示意图

5.1.3 铁谱显微镜

铁谱显微镜是观察谱片上微粒的形貌、大小和成分，以及测定微粒的光密度值的主要工具。铁谱显微镜具有反射光源和透射光源，故又称为双光显微镜。反射光源和透射光源可以同时使用，也可以单独使用，其光强亦可以分别调节。

如图 1.2.2-20 所示，为铁谱显微镜的光路示意图。透射光从显微镜的下部发出经过折射镜折射向上，穿过放在载物台上的铁谱片进入物镜，再通过双路镜到达目镜。反射光从物镜的上部发出经过双路镜折射台向下穿过物镜射到铁谱片，然后又反射向上经过物镜、双路镜到达目镜。铁谱显微镜的上部可以安装照相机，以拍摄微粒的显微照片。铁谱显微镜还配有光密度计，照射到铁谱片上的光线可以折射到光密度计；铁谱片上的微粒的数量不同使光线的强度受到不同的衰减，从而在光密度计上得出不同的读数，这个读数称为微粒面积覆盖百分数，它的大小反映了铁谱片上该位置微粒的多少。

国内外均生产铁谱显微镜，国内产品有：广州光学仪器厂生产的L 2020 型(与北京科学仪器厂的FTP-1型分析式铁谱仪配套)。重庆光学仪器厂的铁谱显微镜与该厂的TPF-1型分析式铁谱仪配套。国外有日本OLYMPUS公司生产的7057-9 Ⅳ型铁谱显微镜与美国SOHIO公司的复式铁谱仪配

集

5.1.4 在线铁谱仪

在线铁谱仪是通过监测机器润滑油或液压系统中的磨粒数量来早期预报机械的故障。在线铁谱仪由传感元件和磨损分析器组成。传感元件装在被监测的机械的适当的表面，磨损分析器可装在其它的位置，液体（润滑油或液压油）泵入传感元件的入口，然后从出口输出到低压点。液体中的磨粒被高梯度磁场分离出来，然后用表面效应电容传感器对磨粒作定量分析。磨粒是按其尺寸大小来沉积的，所以定量分析提供了磨粒的尺寸分布及磨损严重程度。仪器可以测出沉积一定数量磨粒的液体的容积，当磨损率增大时，沉积一定数量磨粒的油的容积就减少，这表明磨粒浓度增加。在线铁谱仪是一个循环装置，当测量全部完成，就能自动清洗传感元件，而开始下一个循环。当整个工作循环完成后，就得出大微粒读数，小微粒读数和磨粒总浓度并分别储存起来，必要时可以分别调出并显示，在微粒总浓度达到设定的范围，磨损分析器上的红色指示灯会自动发光以示告警。

5.1.5 旋转铁谱仪

旋转铁谱仪是利用磁场和离心力分离和沉积磨粒以供观察与测定的仪器。图 1.2.2-21 为旋转铁谱仪的示意图。旋转铁谱仪由圆形磁铁、传动装置、输液装置及控制部件组成。圆形磁铁上放置一张玻璃或塑料基片，圆形磁铁由可变速电机驱动回转。在磁铁的上面有一个圆盘，圆盘上装有基片固定塞，油样注射器和清洗注射器。转动圆盘，可使上述三个部件分别对准磁铁的中心。

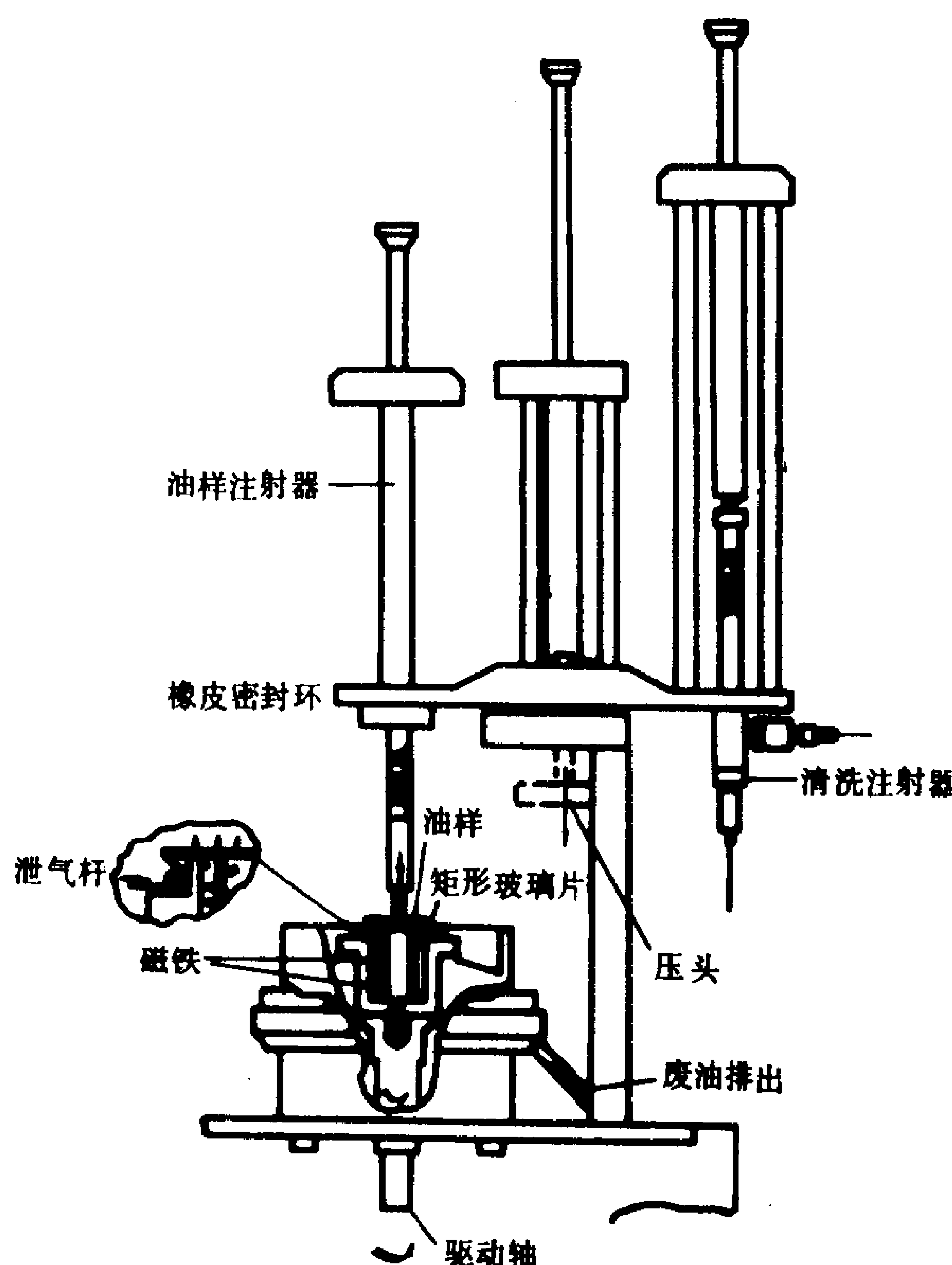


图 1.2.2-21 旋转铁谱仪示意图

用压头把基片压紧在磁铁外圆的橡皮密封环上。把 1 ml经过预处理（加热及震荡）的油样吸入油样注射器，使磁铁以 70 r/min的转速转动，压揿油样注射器使油样缓慢而连续地流到基片上；然后，将磁铁转速调到 150 r/min，用清洗注射器将清洗溶剂缓慢连续地注射到基片上，最后，将磁铁以 200 r/min 的转速转动数分钟，使基片干燥。再拉动泄气杆，取下基片。整个操作过程约需时间 5 ～10 min。

基片制成后，可以在双光显微镜下观察磨粒的形貌、尺寸及成分。基片上的微粒排列成直径分别为 8 mm，12 mm和 20 mm的圆环。不同尺寸范围的微粒分别排列在三个圆的圆周上。内环排列的是大微粒，尺寸范围为 1 ～1000 μm，中环排列的微粒尺寸范围为 1 ～50 μm。排列在外环的微粒尺寸范围为 1 ～10 μm。

由旋转铁谱仪制作的基片，可以在微粒定量仪上进行微粒的测定。微粒定量仪是一个磁力计，可以通过测定微粒的磁矩，然后换算成PQ指数来评估磨损情况。将基片放在微粒定量仪上，并用数字显示出PQ指数，PQ指数的大小反映了微粒数量的大小。除此以外，亦可以将一定容积的油样放在瓶内经过静置，使油样中的微粒沉淀，然后将瓶放在仪器上，亦可测出微粒的数量，并以PQ指数表示。连续测定不同运行阶段的油样PQ指数，绘出它与运行时间的关系曲线，就可以评估机械磨损的发展。

微粒定量仪操作简单，可以自动调零，测定时间短，操作成本低，是一种有效的工具。

5.2 铁谱分析

5.2.1 定性分析

1)光学分析　光学分析是主要的分析方法，它可以观察和分析微粒的形貌、尺寸、数量及成分。光学分析的工具是铁谱显微镜，铁谱显微镜是具有反射光源和透射光源的双光显微镜，它还附有红、绿色滤片及偏振片以扩大其功能。

白色反射光可以观察磨粒的形貌、尺寸和色泽。在白色反射光照射下，铜基合金磨粒呈黄色或红褐色，轴承铅锡合金由于工作时承受不同的热效应及化学效应而呈不同的颜色；大多数其它游离金属磨粒呈银白色。

白色透射光可以观察透明的、半透明的和不透明的磨粒。游离金属磨粒对白色透射光的消光率极大，亚微米级厚度的磨粒也不会透光，因此呈黑色；相反，大多数其它元素和所有化合物微粒均是透明和半透明的，显示的色泽可以作为材料性质的特征。

双色照明是用红色反射光和绿色透射光同时照射。小至亚微米级，大致数百微米级的不透光的游离金属磨粒只反射红光，因而呈红色。由于腐蚀或其它原因形成的化合物微粒，因其对绿色透射光的衰减程度不同而呈绿色或黄色。

偏振光是鉴别非金属微粒，尤其是润滑油中的氧化物，塑料和各种固态污染物的有效而快速的方法。大多数非金属晶体，多晶团，许多塑料和生物材料对偏振光的反应极灵敏，而玻璃，液体等非晶体对偏振光反应不灵敏。

2)加热分析　加热分析法是对铁谱片进行加热，通过观察铁谱片上的磨粒，在加热后生成的氧化膜的不同回火色，来鉴别磨粒的材料成分，以判断机械中发生磨损的具体零件。这是一种简便而有效的定性分析方法。

铁谱片加热的步骤是：将铁谱片放到温度为 330℃的电热平板上，保持 90 s，取下后，即可放在铁谱显微镜上观察。

3)扫描电镜和能谱分析　铁谱显微镜的放大倍数不超过 1000 倍，对于小磨粒难以仔细观察。扫描电子显微镜的放大倍数高，能够清晰地考察各种形态特征及尺寸的微粒；结合x射线能谱分析仪还能确定磨粒的元素组成。

4)磨粒分类和识别　润滑油中的微粒种类很多，其形成机理各异，部分主要磨粒的种类及特征如下。

(1)摩擦磨损微粒(图 1.2.2-22)摩擦磨损微粒是薄片状，表面光滑，长度约为 0.5～15 μm，厚度为 0.15～1 μm，它是由零件表面的剪切混合层疲劳剥落而形成。磨合期间产生的摩擦磨损微粒的尺寸较大，在正常磨损期间，剪切混合层一边剥落一边稳定地产生摩擦磨损微粒，尺寸较小。这种微粒是正常磨损产生的微粒。

(2)切削磨损微粒（图 1.2.2-23）切削磨损微粒是切屑状的螺旋形或曲线形微粒。大的

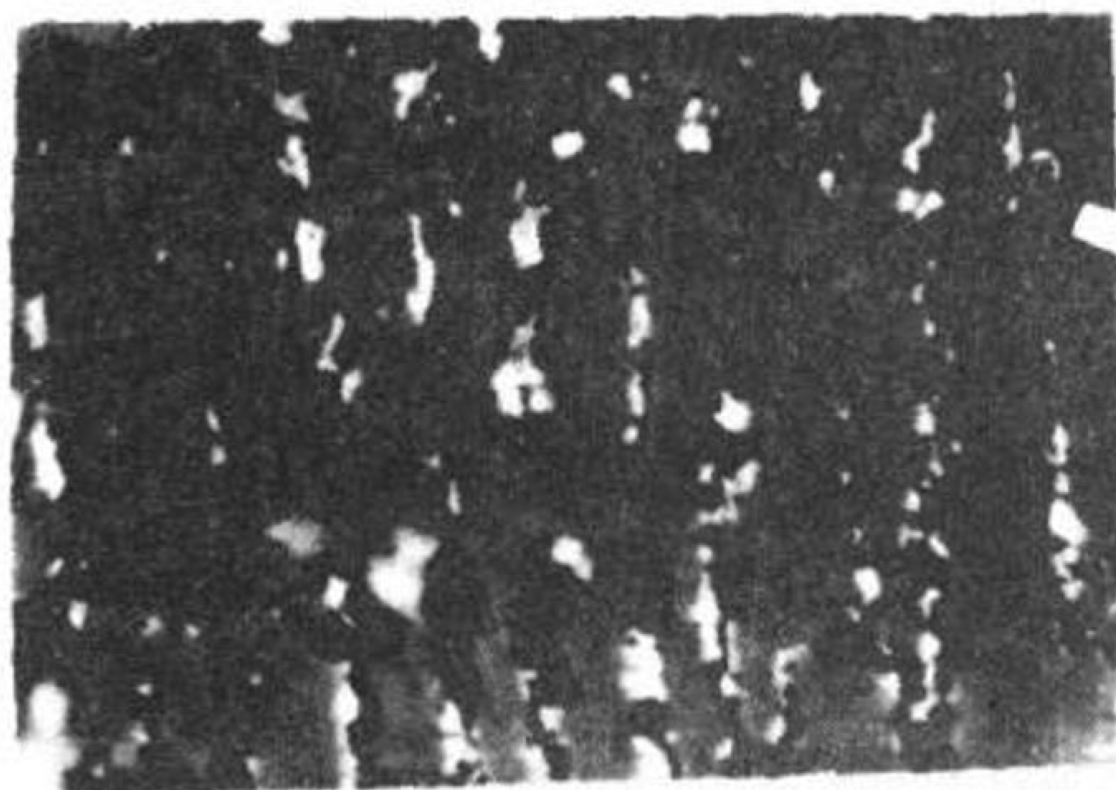


图 1.2.2-22　摩擦磨损微粒

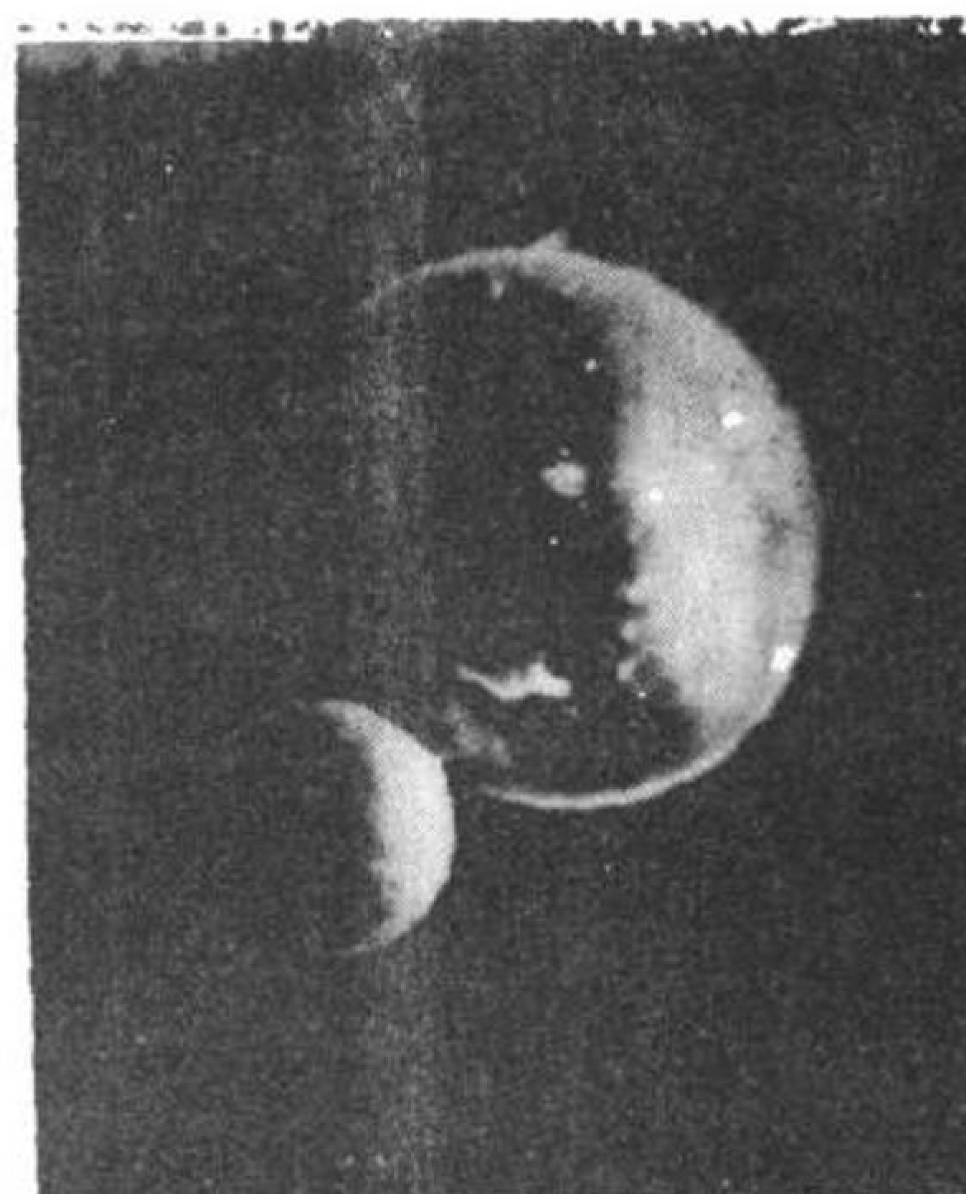


图 1.2.2-23　切削磨损微粒



图 1.2.2-24　球状微粒

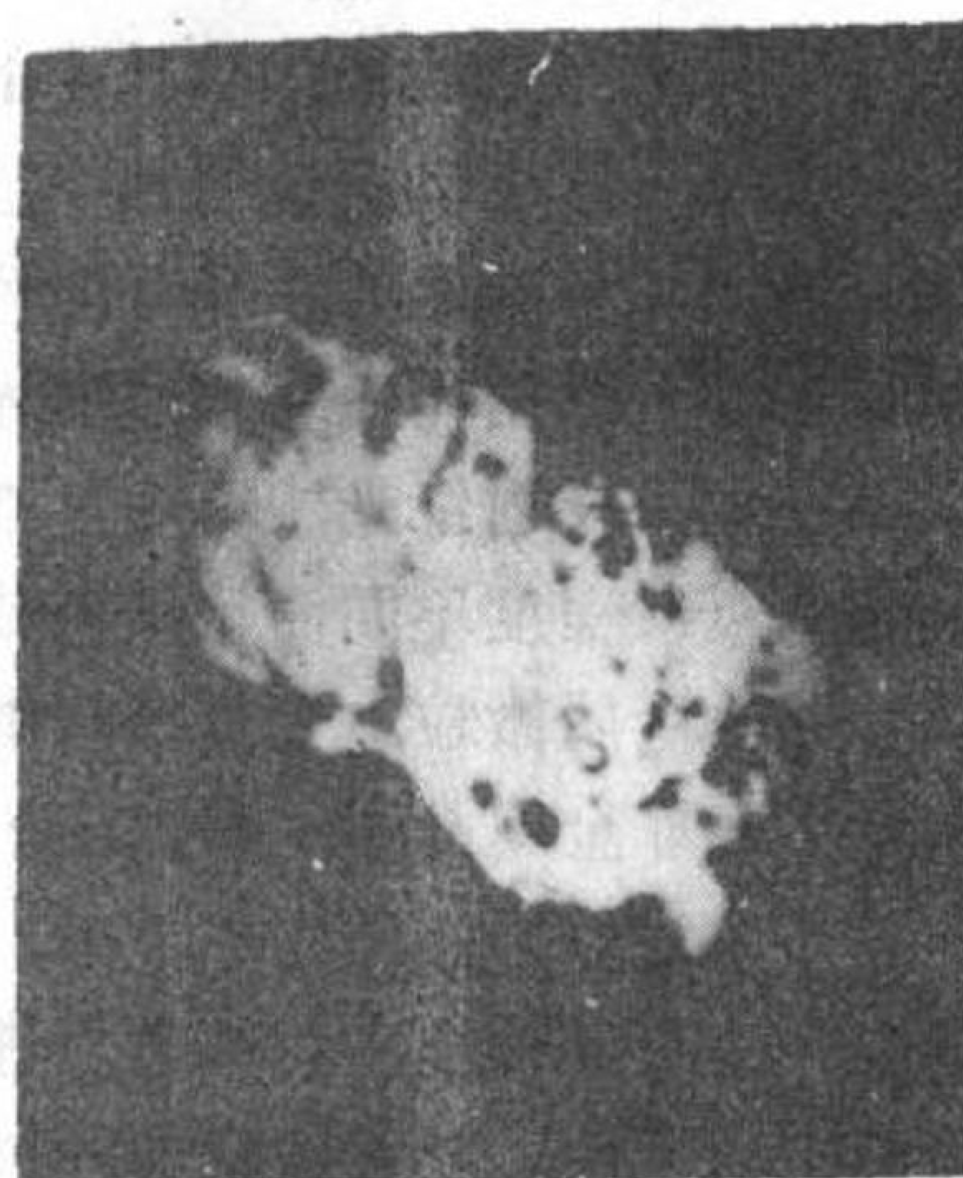


图 1.2.2-25　疲劳磨损微粒

切削磨损微粒其长度为 25～100 μm，宽度 2 ～ 5 μm。它是由较硬表面的锐边、凸起或裂纹插入并切削软表面而形成。小的切削磨损微粒其长度小于 10 μm，宽度小于 1 μm，它是由于磨料微粒嵌入较软的表面，切削硬表面而成。其尺寸与磨料的尺寸成正比。切削磨损微粒较多时，是故障损伤的前兆。

（3）球状微粒（图 1.2.2-24）球状微粒呈圆球状，它主要是由滚动轴承的疲劳、焊接、磨削、气蚀及浸蚀所致。它的形成机理有多种解释。滚动轴承疲劳产生的球状微粒的直径小于 3 μm。其它情况产生的球状微粒其直径主要在 10 μm以上。数量较多的球状微粒是机械出现故障的标志。

（4）疲劳磨损微粒（图 1.2.2-25）疲劳磨损微粒的形状与滚动疲劳微粒相似，有光滑的表面和不规则的形状，但是厚度较大，类似块状，故又称为块状微粒，其尺寸从几微米至几



图 1.2.2-26 严重滑动磨损微粒

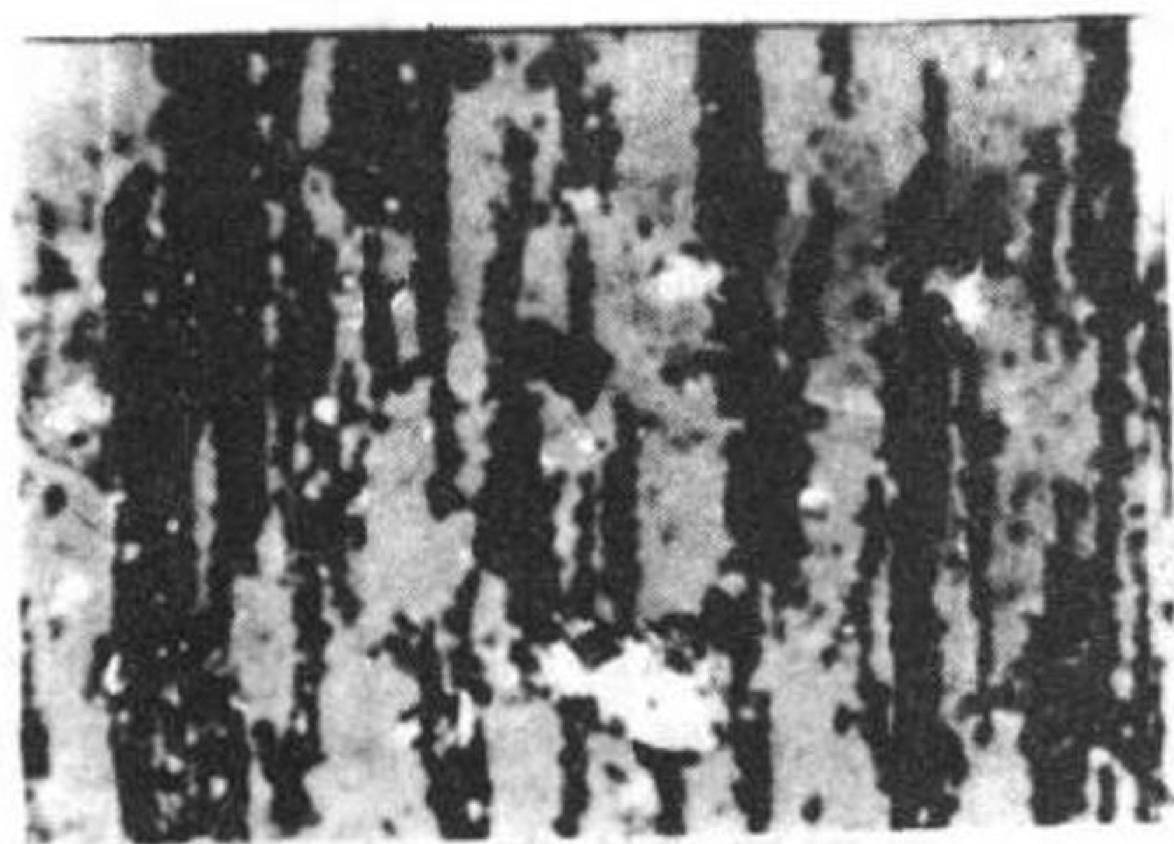


图 1.2.2-27 铜微粒

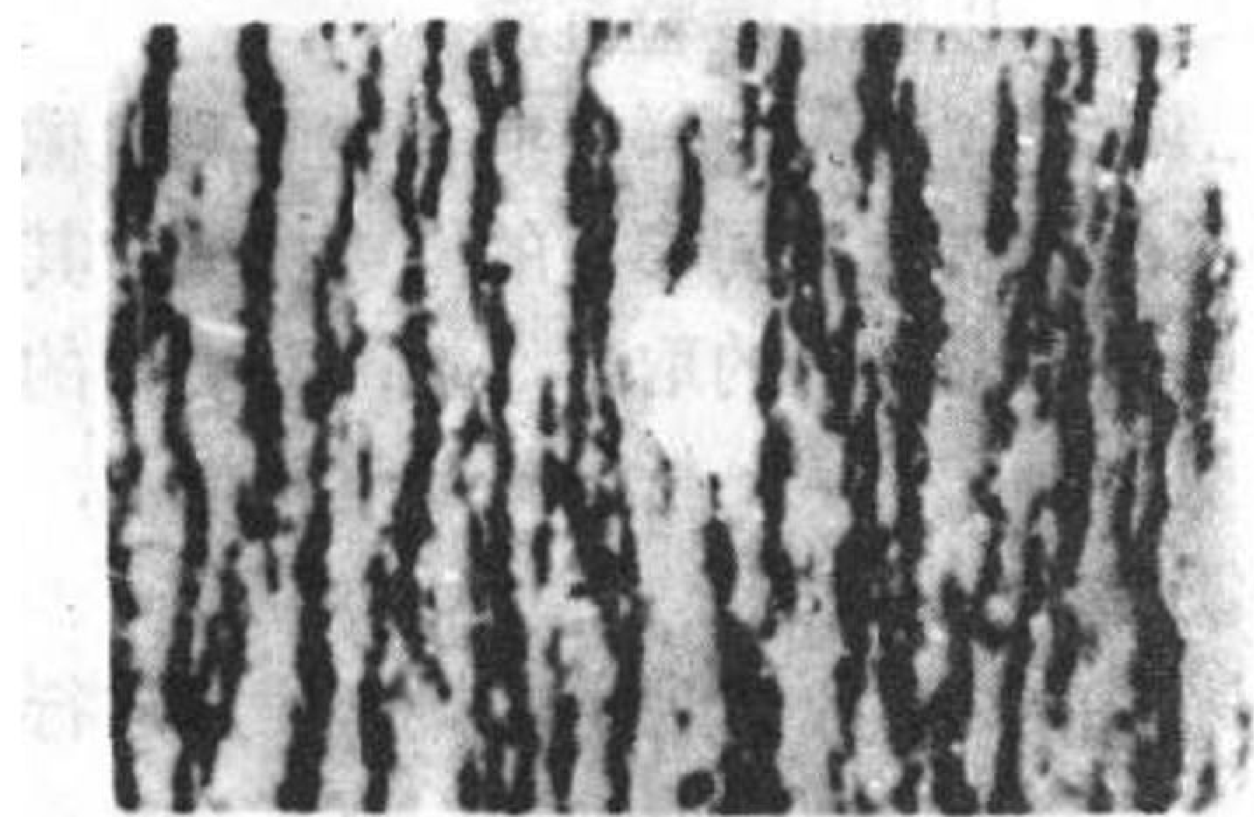


图 1.2.2-28 铝微粒

百微米。疲劳磨损微粒产生于齿轮轮齿的节圆处，齿面的拉伸应力引起疲劳裂纹，裂纹朝轮齿深处发展，直至剥离形成块状磨粒。

（5）严重滑动磨损微粒（图 1.2.2-26）严重滑动磨损微粒的表面有明显的划痕和开裂的现象，轮廓平直。尺寸较大，可达 20 μm以上。这种磨粒是异常磨损的征兆。

（6）有色金属磨粒　有色金属磨粒亦可沉积在铁谱片上，它们的沉积方向是随机的，其长轴方向不一定与磁力线方向一致，并能沉积在铁磁性磨粒的链线之间；它们在谱片全长均可能沉积，不符合铁磁性微粒的沉积规律。图 1.2.2-27 为铜微粒，图 1.2.2-28 为铝微粒。

5.2.2 定量分析

铁谱定量分析的参数值较多，目前常用的有以下几种：

1）直读铁谱仪读数　直读铁谱仪能够测出D_L及D_S二个读数。D_L代表油样中大微粒的浓度，D_S代表油样中小微粒的浓度。

在进行定量分析时，通常使用的定量参数是磨损严重指数I_S。

$$I_S=(D_L+D_S)(D_L-D_S)=D^2{}_L-D^2{}_S \quad (1.2.2\text{-}10)$$

式中：D_L+D_S——总磨损值；

D_L-D_S——磨损严重度。

2）微粒覆盖面积百分数　铁谱片上磨粒的数量和尺寸分布是反映磨损状况的两个定量信息，磨粒数量是用铁谱片上磨粒的覆盖面积百分数来度量的，沿铁谱片长度方向不同位置上磨粒覆盖面积百分数的变化即给出了磨粒的尺寸分布。为测定铁谱片上不同部位的磨粒覆盖

面积百分数，将铁谱读数器与双色显微镜连接，铁谱读数器是一个光密度计，它的光敏元件安装在显微镜的光路内，数字显示部分直接显示出被测部位的磨粒覆盖面积百分数，这是一种利用机械地测定消光值来确定磨粒覆盖面积的方法。

通常测定铁谱片上入口处及离出口端50 mm处的微粒覆盖面积百分数。前者为大微粒覆盖面积百分数，用A_L表示，后者为小微粒覆盖面积百分数，用A_S表示。

5.3 铁谱监测

5.3.1 油样采集

油样采集是铁谱监测的重要环节，取样工作应该保证采集到能代表当时机械磨损状态的油样。油样采集的正确程度直接影响铁谱监测的正确性。

1)取样点　取样点必须设在能够采集到有代表性油样的位置上，即必须位于润滑油流动的位置，取样点通常设在润滑油管道或润滑油箱两个位置，管道取样可以取到代表油样，取样点应设在滤油器前的阀门或旋塞处，以防止微粒（尤其是大微粒）被滤油器所过滤。取样时，应该先开启阀门或旋塞，冲去积存在阀门，旋塞和支管中的残油，然后用取样瓶接取20 ml油样。油箱取样必须用取样器，但是每次取样器的取样管伸入油箱时，应保证始终在同一位置，否则会影响油样中微粒的数量。

取样时，机器最好处于正常运转的状态，若在机器运转时不能取样，必须在机器停车后尽快取样，以防止微粒沉淀。

2)取样周期　取样周期与被监测机械的性能参数、用途及实际运转状态等有关。不同类型的机械，或者不同参数的同类机械，其取样周期亦不同。为了能实现监测、诊断和预报故障，必须确定机械的取样周期，而最好的办法是通过试验比较，从而确定一个经济合理的取样周期，根据铁谱分析结果及运转情况，可以适当地调整取样周期。

5.3.2 油样的制备

采集的油样应按规定的操作程序进行预热、震荡和粘度稀释等预处理，并按规定的操作步骤测定直读读数值或制谱。

在有些油样中，微粒数量很多，其直读铁谱读数值超过100，这时，读数值与实际微粒数量不是线性关系，致使数字失真。制成的铁谱片上，微粒相互重叠堆积（尤其在谱片的入口端），难以观察到各个微粒的实际形貌，且无法反映微粒的实际尺寸甚至引起错误的结论。

为了解决这个问题，可以对微粒数量很多的油样进行浓度稀释。稀释比一般是选用对数规律，即10：1或100：1的比例。如稀释度为10：1则是将9 ml经过过滤的新油与1 ml的油样均匀混合，混合前，它们都必须进行前述的预热，油样还须进行振荡。新油的牌号最好与油样的牌号相同。

油样的稀释比例，亦可以根据油样的实际情况来选定。

5.3.3 监测分析

铁谱监测分析包括定量分析和定性分析。定量分析主要是分析定量参数值的变化趋向。在正常磨损情况下，参数值应该是平稳的或者是在小范围内波动。如果参数值出现骤升或骤降的情况，则应引起注意。这种现象有可能是由于机械负荷过大，产生异常磨损，或滤油器堵塞而造成，润滑不良等原因所致。除了对照机械运行情况的记录外，还应从谱片上观察微粒情况作进一步的诊断。

定性分析主要是观察谱片上微粒的形貌，以判断其类别，根据不同的微粒形成机理，来

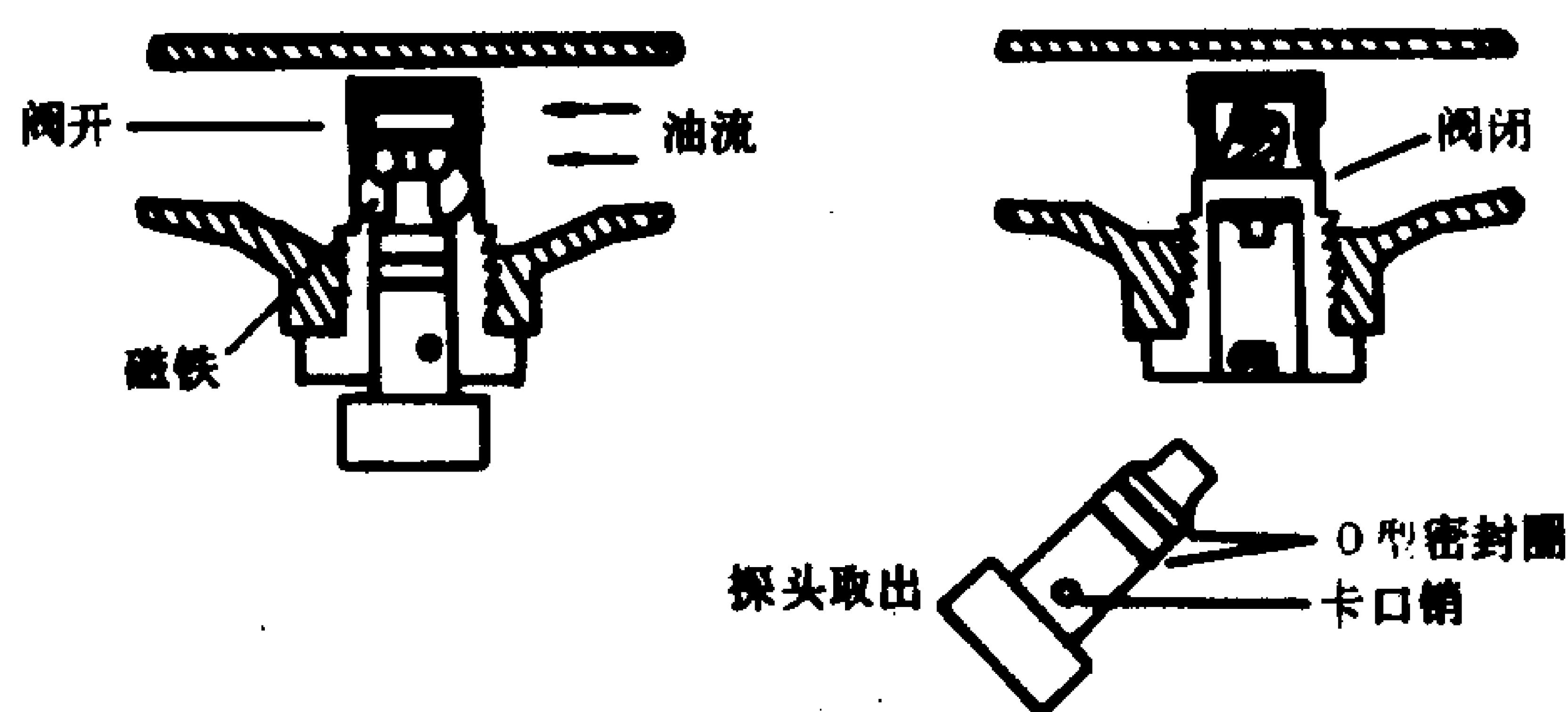


图 1.2.2-29　磁塞结构示意图

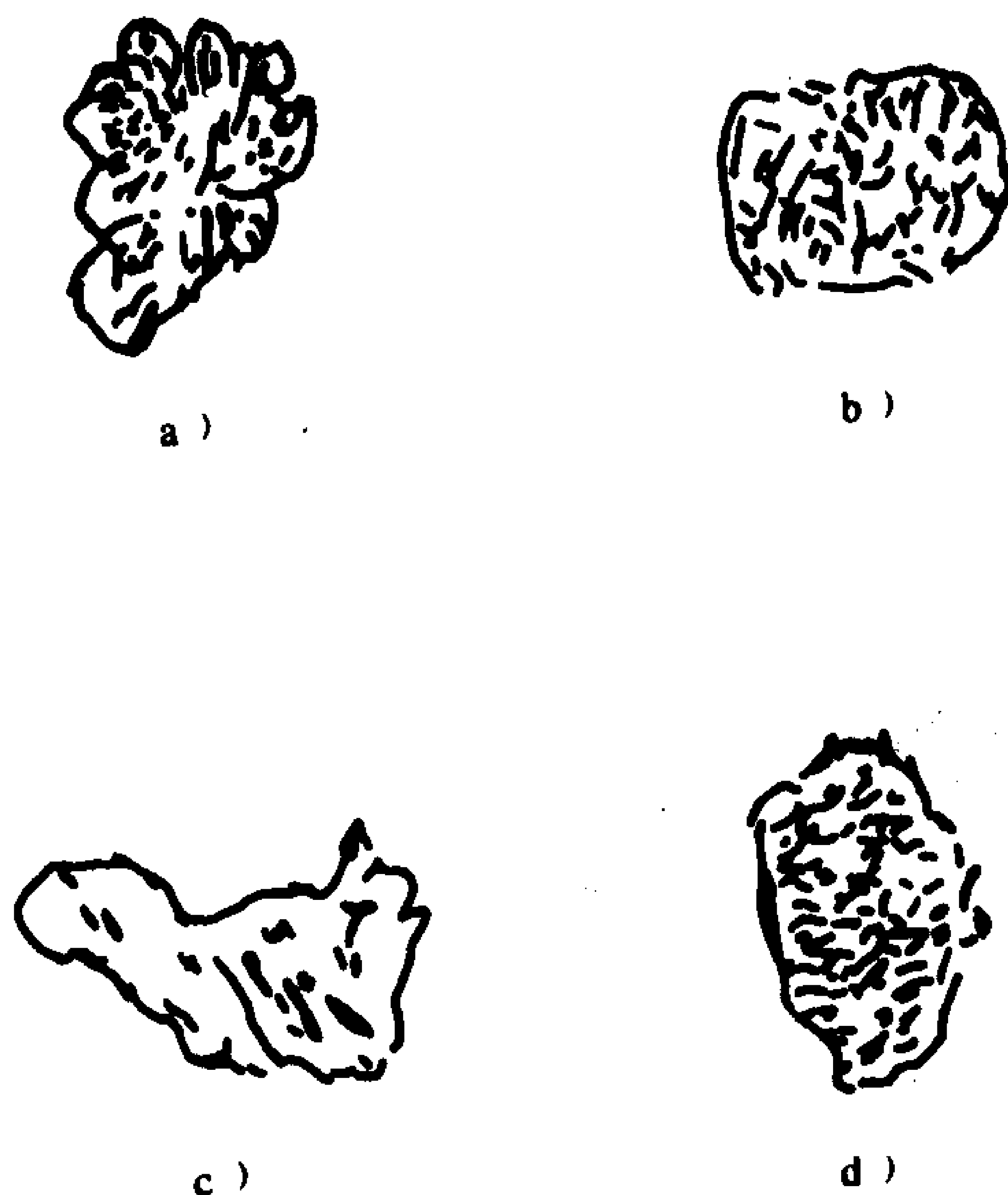


图 1.2.2-30　典型磨屑图形

a）滚珠磨屑—圆玫瑰花办形，表面带有辐射条纹；

b）轴承滚圈磨屑—圆形，表面有裂纹及交叉划痕；

c）滚柱磨屑—卷曲的长方形，表面沿宽度方向有平行线；

d）齿轮轮齿磨屑—形状不规则，表面呈灰白色

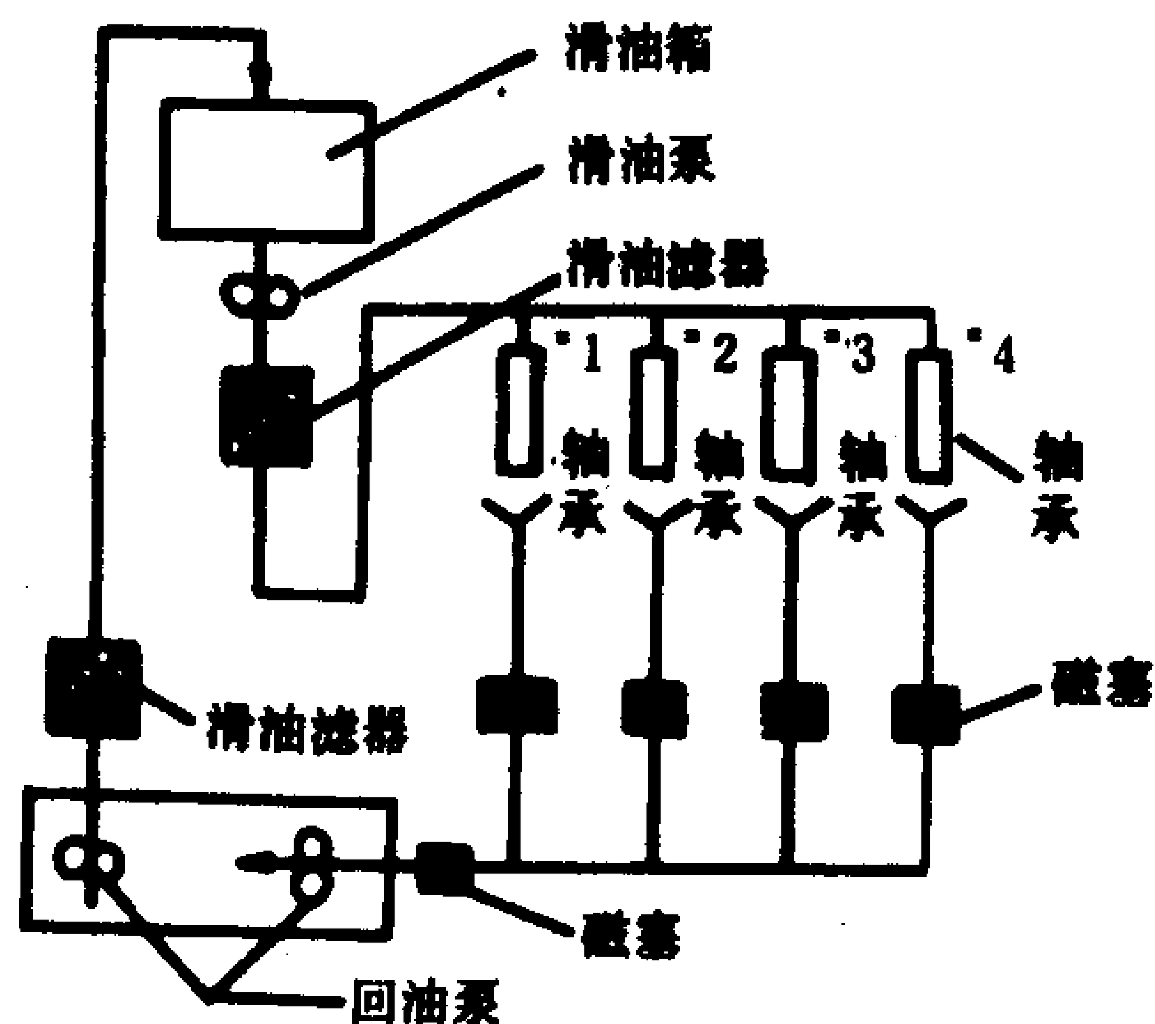


图 1.2.2-31　磁塞在机械润滑系统中的布置原理图

判断机械零件的磨损状况等；同时通过目测、加热及能谱分析等方法分析微粒（主要是异常的微粒）的成分，并且对照被监测机械的各个润滑零件的材料成分，以判断这些微粒的来源，从而预测异常现象的根源。

6　磁塞检测

磁塞检测是利用磁性原理监测润滑油中铁磁材料磨粒的在线监测方法。探测的磨粒尺寸范围大致为 25～400 μm，它主要用于探测齿轮、滚动轴承等零件的早期故障。磁塞检测所采用的装置有多种，都具有结构简单，使用方便及在线监测的特点。

6.1　磁塞

图 1.2.2-29 为磁塞结构示意图。磁塞由本体和磁性探头所组成。本体端部开有横向孔并且装设单向阀，本体用螺纹联接在润滑系统上。磁性探头的顶部是一块圆形的永久磁铁，中部装有两根O形密封圈和一个卡口销，端部是滚花的圆柱体。将探头插入本体，用卡口销固定，探头顶部的磁铁将单向阀顶开，于是磁体位于本体横向孔间，润滑油流过横向孔及磁铁时，铁磁性磨屑被吸附在磁铁端部。定期将探头取下，本体上的单向阀借弹簧的张力而关闭，防止润滑油漏泄。将吸附在磁铁上的磨屑取下放在一张白纸上，置于放大倍数为 10 倍的光学显微镜下观察磨屑的图形。根据磨屑的形状可以判断已磨损零件的种类，根据磨屑的大小可以判断零件磨损的程度。

磁塞可以采集到较大尺寸的磨屑，国外已经用于军用、民用燃气轮机齿轮箱的工况监测和故障诊断。并

且有良好的效果。图 1.2.2-31 是磁塞在某机械润滑系统中布置原理图。

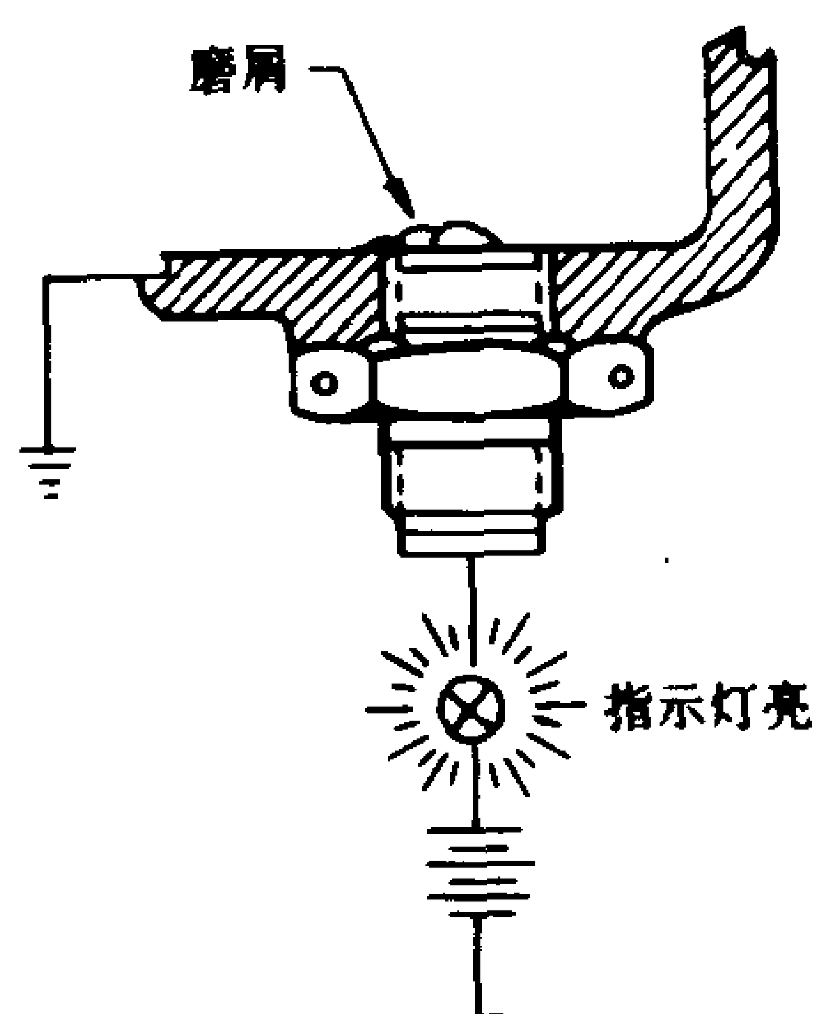


图 1.2.2-32 电磁塞工作原理图

6.2 电磁塞

电磁塞(图 1.2.2-32)安装在机械润滑系统的润滑油路中，并分别连接在一个低压电路中，电磁塞与机械润滑系统在电路中是不导通的，当电磁塞上的永久磁铁吸附润滑油中的铁磨屑，积累到一定数量时，便使磁铁与机械润滑系统电路导通，从而形成闭合电路，于是电路中的指示灯亮，表明磨屑的数量已达到告警的程度。指示灯布置在操纵室的控制板上，操纵人员可根据指示灯的灯光信号及时了解机械的工况。电磁塞已经在国外成功地应用于航空发动机齿轮箱的工况监测。

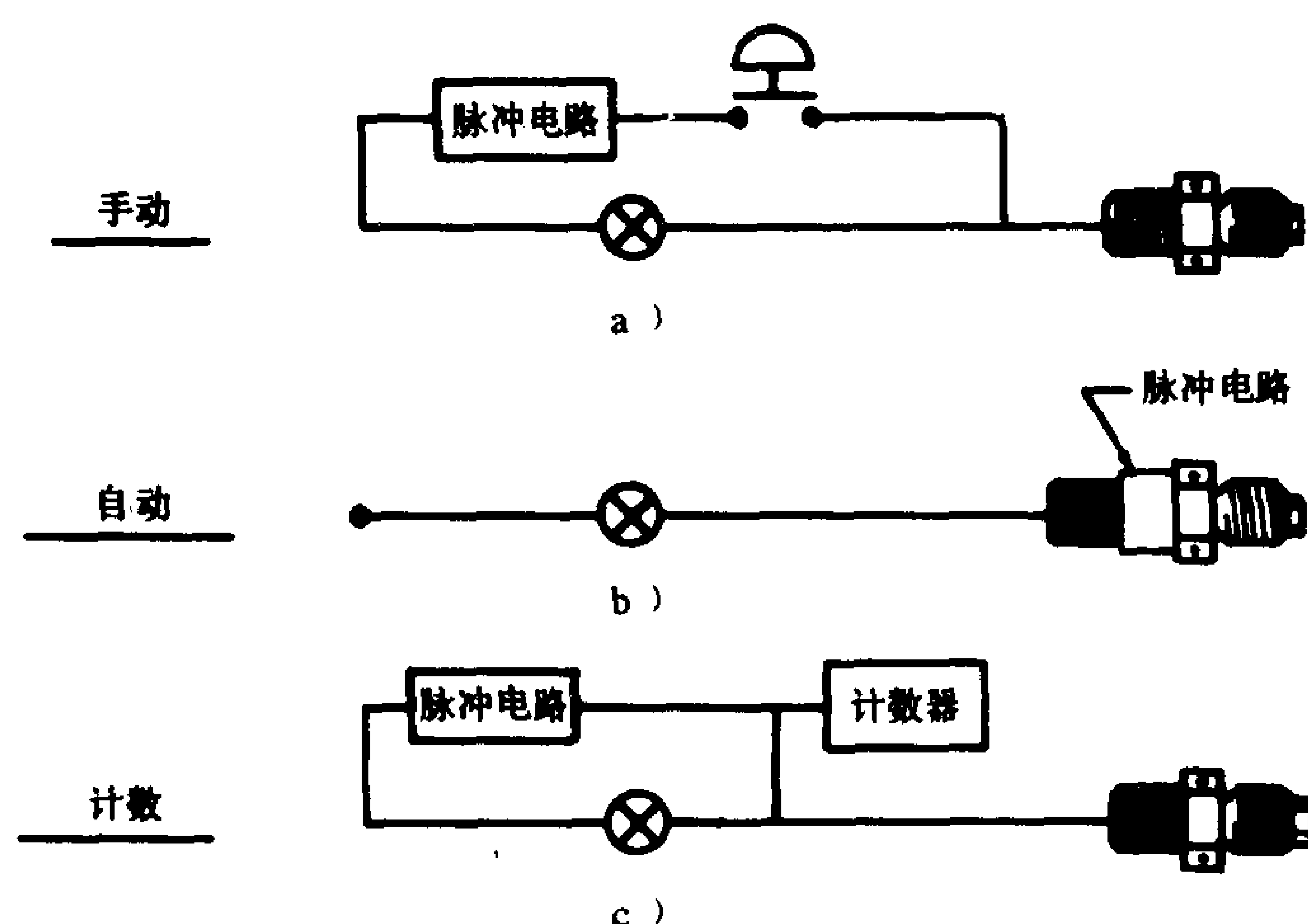


图 1.2.2-33 脉冲电磁塞电路原理图

6.3 脉冲电磁塞

脉冲电磁塞是在上述电磁塞的电路中增加电容元件所组成。当磨屑连通磁铁和机械润滑系统时，电容网络可以发生电流脉冲，电流脉冲的能量足以在几毫秒内熔化微小的磨屑，而防止微小磨屑对监测信号的干扰。图 1.2.2-33 是脉冲电磁塞的三种电路原理图：图 1.2.2-33 a)是手动操作产生脉冲电流的电路原理；图 1.2.2-33 b)是自动产生脉冲电流的电路原理；图 1.2.2-33 c)是在上述两种方式的电路内增加一个计数器以记录脉冲电流发生的次数。

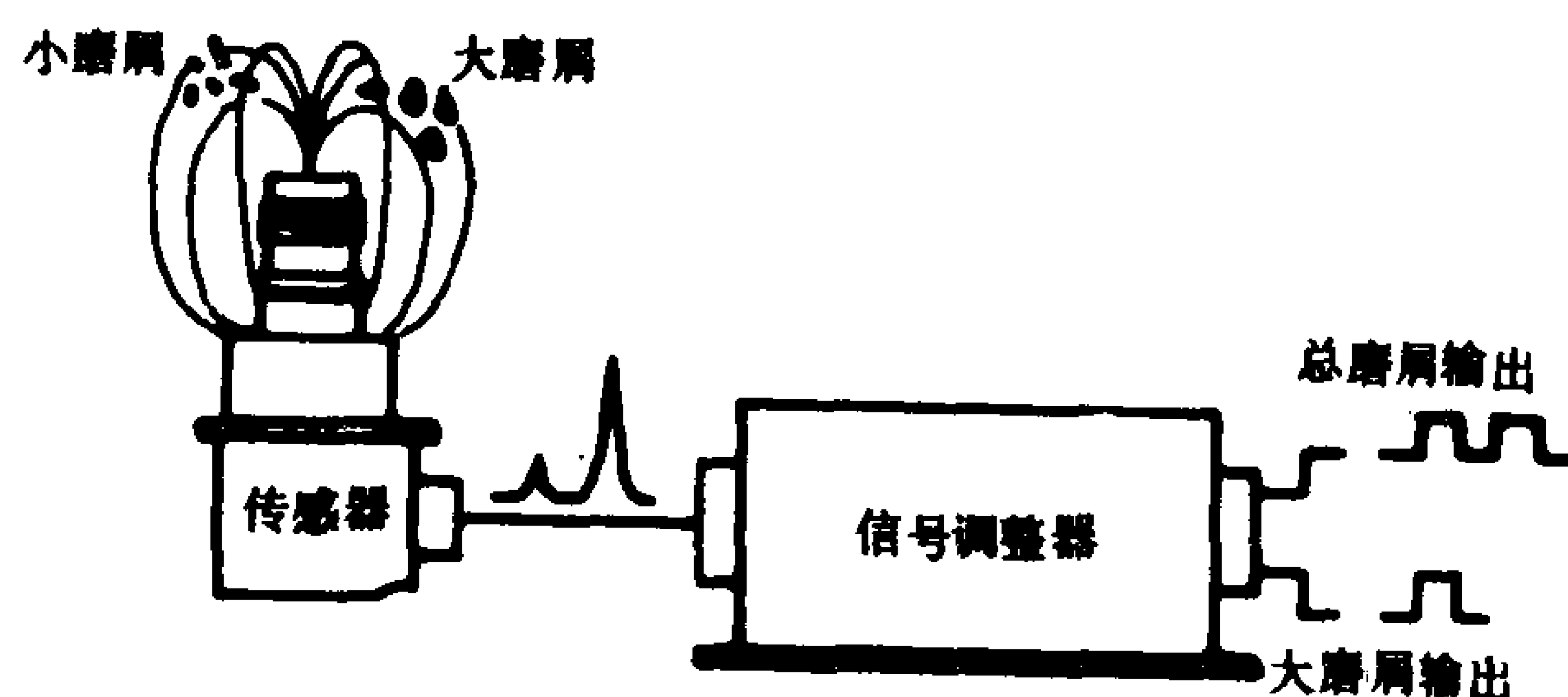


图 1.2.2-34 定量磨屑监测器工作原理图

6.4 定量磨屑监测器

定量磨屑监测器是一种磨屑传感和信号调节装置，它能够早期检测故障并且确定机械零件的磨损严重程度。

定量磨屑监测器由传感器，前置放大器和信号调节器组成，如图 1.2.2-34 所示。传感器能够吸附铁磨屑并产生与磨屑质量成正比的电压；前置放大器能将传感器输出的

信号放大；信号调节器将输入的脉冲信号分成两类，一类表示重量大于 5 mg的微粒总量，另一类表示重量大于 40 mg的大微粒总量，并在计数器上显示出来。对比显示数据的变化趋向和绝对值，可以判断机械的磨损状况。

7 无损检测技术

7.1 概述

无损检测技术是在不破坏机械及零件的形状，不改变或不影响其使用性能的条件下，检测其表面与内部缺陷、物理性能及几何度量的方法。

无损检测技术的主要用途为：无损探伤，找出零件及结构件表层或内部的缺陷并进行定性、定量分析；几何度量，测定涂层或镀层厚度、表面腐蚀状态、硬化层深度和应力应变状态；材质检查，测定材料的物理性能和组织结构。现场监测，对使用中的机械进行就地或动态检测，提出被监测机械中缺陷的变化信号。

无损检测技术可以降低产品的成本，提高机械运转的安全可靠性以及评定和改进机械的制造工艺。

无损检测技术的种类很多，最常用的有光学目测法、渗透检测、超声波探伤、磁粉探伤、涡流检测和射线探伤等。此外，还有红外检测和声发射检测等。各种方法有其独特的优点和不足之处，因此，可以在一定的范围内使用或者联合使用。

7.2 光学目测法

光学目测检查是由检查人员通过观察机械及零件的色泽和表面形状来进行分析和诊断。这种方法简单、实用，但检查人员必须有较丰富的经验才能作出正确的判断，而且还受到机械位置等的限制。例如肉眼观察只能观察机械外部的情况，不拆卸机械，就无法观察到机械内部的状况。

为了对封闭的或无法接近的机械部位，如发动机的气缸、容器和齿轮箱内部，可以利用多种光学仪器来检查。这些仪器简单，操作方便，有很好的使用价值。

反光镜和放大镜是最简单的手持光学器械，如果带有照明探头，则观察效果更佳。

潜望镜由三棱镜和透镜等组成，可用来检查容器和细管等的内表面。

工业用光学纤维内窥镜是用光学纤维传光束或传象束的诊察光学仪器。它的特点主要是利用光学纤维的柔软性，弯曲伸入到机械内腔中去，根据需要以很小的曲率半径沿弯曲通道传递光线及图象，以便观察或照相，而不必拆卸或破坏机械。

工业用光学纤维内窥镜主要用于检查各种管道和机器内腔中的裂纹、异物、缺陷等，例如用于检查锅炉管道、铸件、炉体内部、发动机的气缸、齿轮箱、燃烧室内部，也可用来监视正在运动的机械等。目前，已用于各种机械设备的检验维修工作中。

工业内窥镜主体部件，如图 1.2.2-35 所示，它是由目镜操纵头、弯曲操纵手柄及物镜窥头三大部分组成。目镜操纵头部分设有视度调节环，根据各人视力状况，可将目镜调至最佳状态。并设有与照相机和摄象机联接的专用接口，弯曲操纵手柄部分可以将物镜窥头的弯曲部分向上下弯曲，最大可弯曲 120°。

将冷光源的光通过光输入插头及传光束送到被检测的物体上，然后物体的形象通过物镜

窥头及传象束送到目镜组来，通过调节视度环，可使人在目镜前看到被检物体。调节弯曲操纵手柄，通过操纵钢丝，使物镜窥头弯曲，以便于大面积观察。

目前，国内已有工业内窥镜生产，有北京玻璃研究所的GK-I型工业光学纤维内窥镜，上海医用诊断仪器厂的GX型工业纤维内窥镜和徐州光学仪器厂的GGN-1型工业内窥镜等。

7.3 渗透检验

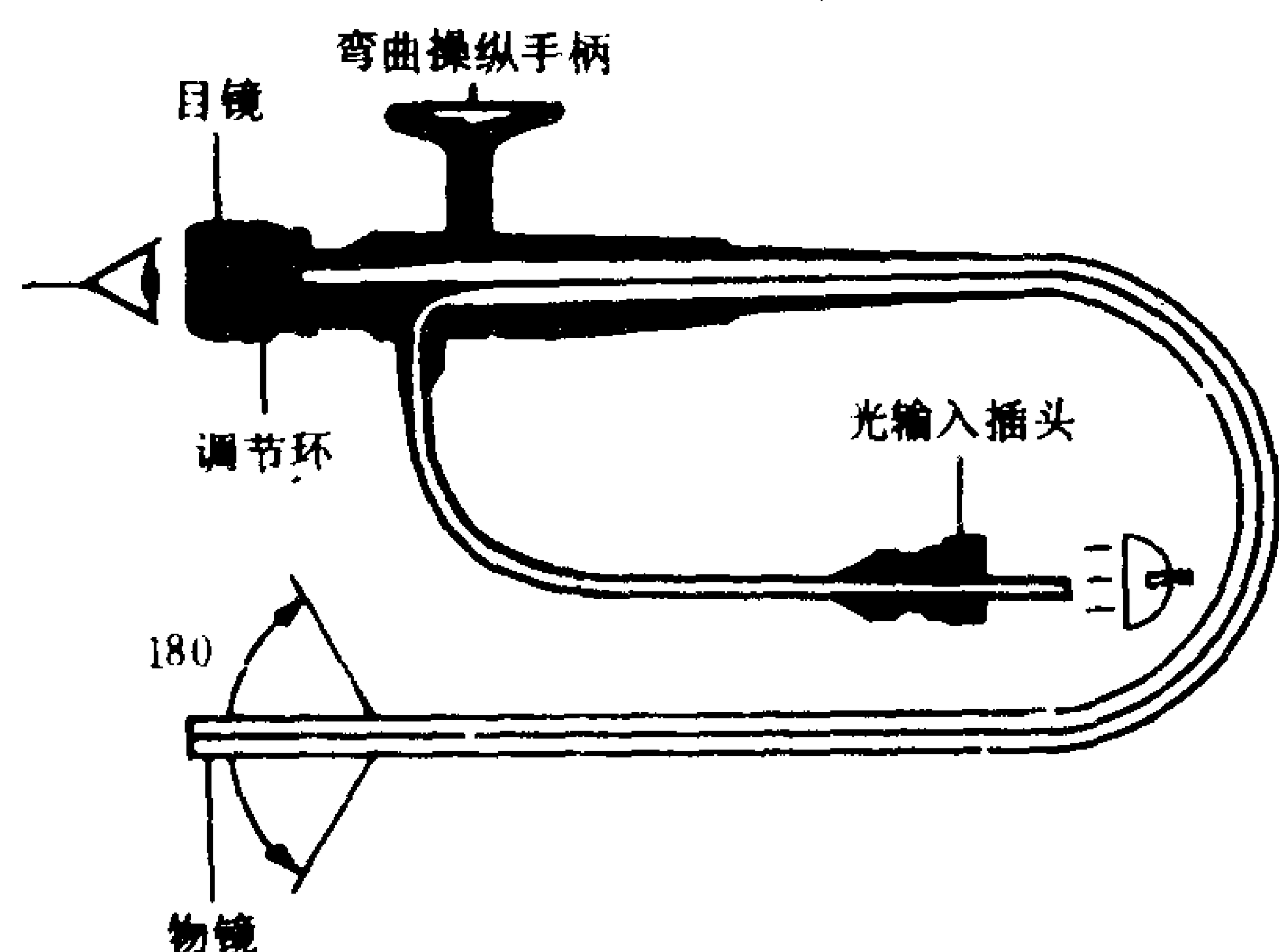


图 1.2.2-35 工业内窥镜结构示意图

渗透检验是把受检验的零件表面处理干净以后，使渗透液与受检验零件表面接触，由于毛细管的作用，渗透液将渗入到零件表面开口的细小缺陷中去，然后清洗零件表面残存的渗透液，再用显象剂吸出已渗透到缺陷中的渗透液，从而在零件表面显示出缺陷的图象。

渗透检验按缺陷显示方法不同，分为荧光显示的荧光法和颜色显示的着色法。荧光法和着色法按其渗透液清洗方法不同，又分为水洗型、后乳化型和溶剂清洗型三类。无论哪种渗透法，都只能检验材料表面开口缺陷，对于埋藏在材料内部的缺陷，渗透法是无能为力的。液体渗透检验也不适合检查多孔性材料或多孔性表面缺陷。

液体渗透检验的操作步骤分为四个阶段：

1）渗透过程　把被检验的零件的表面处理干净（预清洗）之后，使荧光渗透液或着色渗透液与零件接触，从而使渗透液渗入零件表面的开口缺陷中如图 1.2.2-36 a）所示。

2）清洗过程　用水或溶剂清洗零件表面所附着的残存渗透液，如图 1.2.2-36 b）和c）所示。

3）显象过程　清洗了的零件经干燥后，施加显象剂（白色粉末），使渗入缺陷中的渗透液吸出到零件的表面，如图 1.2.2-36 d）所示。

4）观察过程　被吸出的渗透液在紫外线的照射下发出明亮的荧光，或在白光（或自然光）照射下显出颜色，从而显示出缺陷的图象，如图 1.2.2-36 e）所示。

在操作过程中，特别要注意，为使渗透液尽可能多地渗入缺陷中和防止渗透液污染而降低灵敏度，因此，零件表面必须清除干净。其次，在清洗零件表面残存渗透液时，要注意将残存渗透液清除干净、又要防止过洗，影响检验灵敏度。

渗透检验只适用于检查表面缺陷，由于这种检验方式不受材料和零件形状的影响，而且具有较高的灵敏度，因此广泛地用于各种金属铸件、锻件和焊接件的检验，同时也可用于陶瓷及塑料的检验。表面裂纹的检测极限为长 1 mm，宽 0.1 mm，深 0.1 mm。

在选择合适的渗透检验方法时，必须考虑可能产生的缺陷种类、零件的表面状态、电源、水源以及渗透剂的性能和经济效果等因素。

目前，上海探伤机厂生产YX-125 型荧光探伤仪，营口仪器厂生产TY-125 型荧光探伤仪等设备。

7.4 超声波探伤

7.4.1 基本原理

超声技术是广泛应用的一种无损检测方法，它可以检测机件内部的裂纹和其它缺陷，其优点是灵敏度高，操作方便，检测速度快，对人体无害；但操作人员必须有一定的经验和分析判断能力。

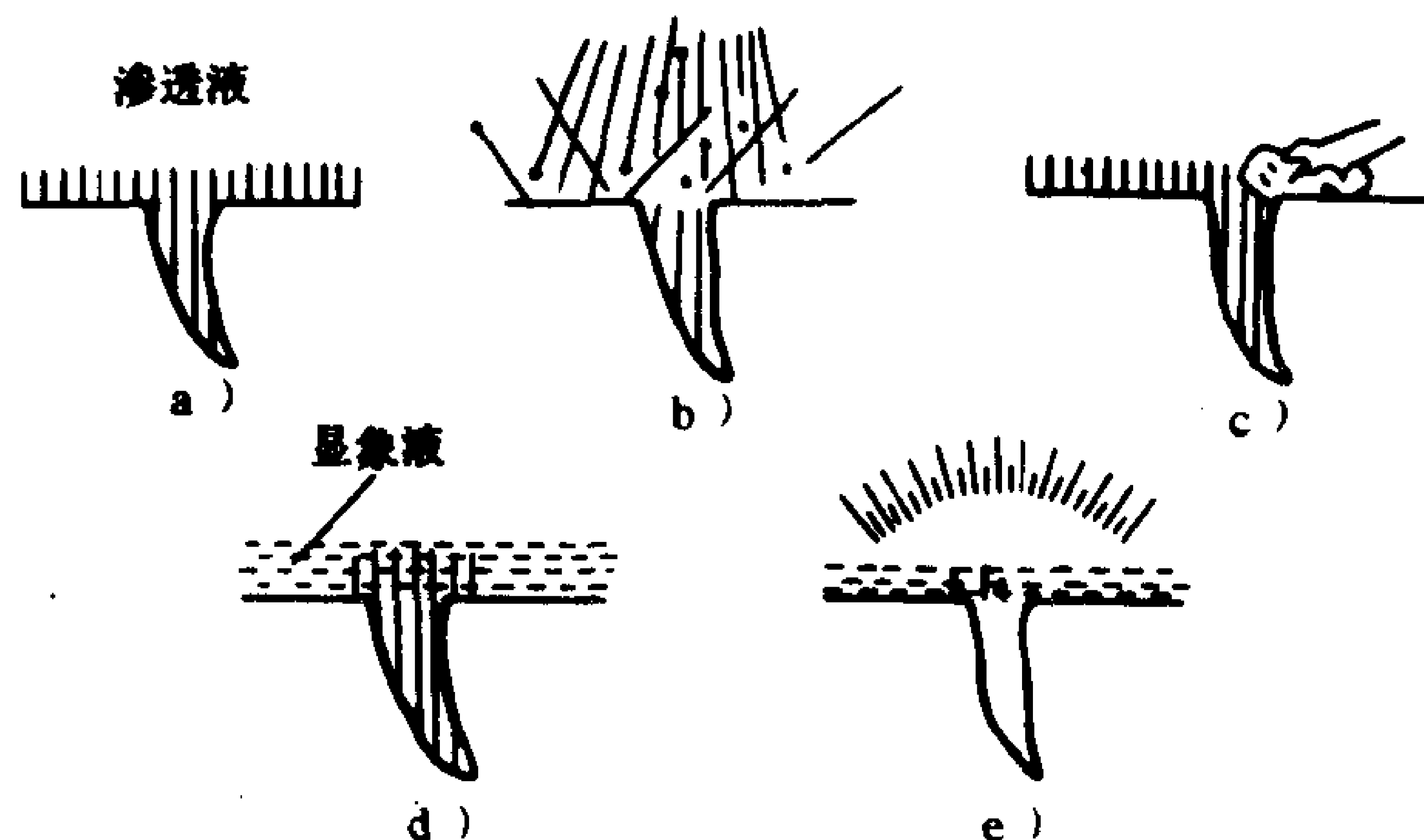


图 1.2.2-36 渗透检验的步骤

a)渗透；b)水清洗；c)溶剂清洗；d)显象；e)观察

超声波产生的原理是利用某些晶体（如石英、钛酸钡、锆钛酸铅等）的压电效应。在晶体的电轴方向加上交变电压，在交变电压作用下，晶体发生拉伸和压缩变形，即发生振动，产生超声波；反之，当晶体在外来机械力作用下而发生拉伸和压缩变形时，晶体表面产生异号电荷，在电轴方向形成交变电压。无论压电效应是正或反。振动频率与电频率相同，由于机械能和电能相互转换，就为超声波探伤提供了可能。

超声波探伤的原理是利用超声波通过两种介质的接触界面时，超声波发生折射和反射现象来发现零件内部的缺陷。当超声波由空气传向金属或由金属传向空气时，差不多有 99% 被反射。零件中的缺陷一般都是中空的，即在缺陷的地方存在金属和空气的界面，根据上述原理通过指示仪器即可发现缺陷。

7.4.2 仪器及探伤方法

1)超声波探伤仪　超声波探伤仪是进行超声波探伤的仪器设备，根据不同的探伤目的和要求，有不同型式的超声波探伤仪。汕头超声仪器厂、上海超声波仪器厂及营口仪器厂等单位均生产不同型号和用途的超声波探伤仪。

超声波探伤仪由超声换能器和探伤仪组成。超声波探伤所用的换能器是压电晶体片。一般装在探头内。当高频（0.5~25 MHz）电脉冲加于晶片时，晶片发生变形振动而发射超声波，当探头与被检测工件接触时，超声波便进入工件。在工件中遇到裂纹、气孔等缺陷或界面时，超声波反射回来作用于晶片上，晶片接受并产生相应的电脉冲。配以放大器，显示装置构成了超声波探伤仪。

(1)探头　探头主要由压电晶片，外壳等组成。可发射和接收超声波，是超声信号转换的重要元件。

探头通常分直探头、斜探头、表面波探头及可变角、聚焦、浸液等探头。

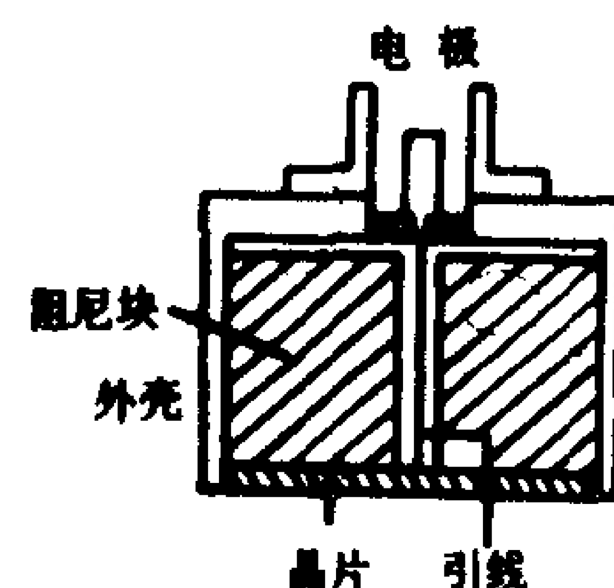


图 1.2.2-37 直探头结构示意图

①直探头　又称平探头，可发射接受纵波。它由压电晶片、保护膜、阻尼吸收块，外壳和电缆接插电极等组成，如图 1.2.2-37 所示。探头直接与工件相接触，并在工件上移动，因此，

须加上耐磨的保护膜，以保护晶片不受磨损。

②斜探头　又称横波探头。它可发射接收横波，由吸收块及斜楔块等组成，吸收块和晶片与直探头相同，斜楔块一般用有机玻璃做成，由晶片发射出来的纵波通过与工件接触的斜楔块进入工件，折射产生的波型转换成横波。

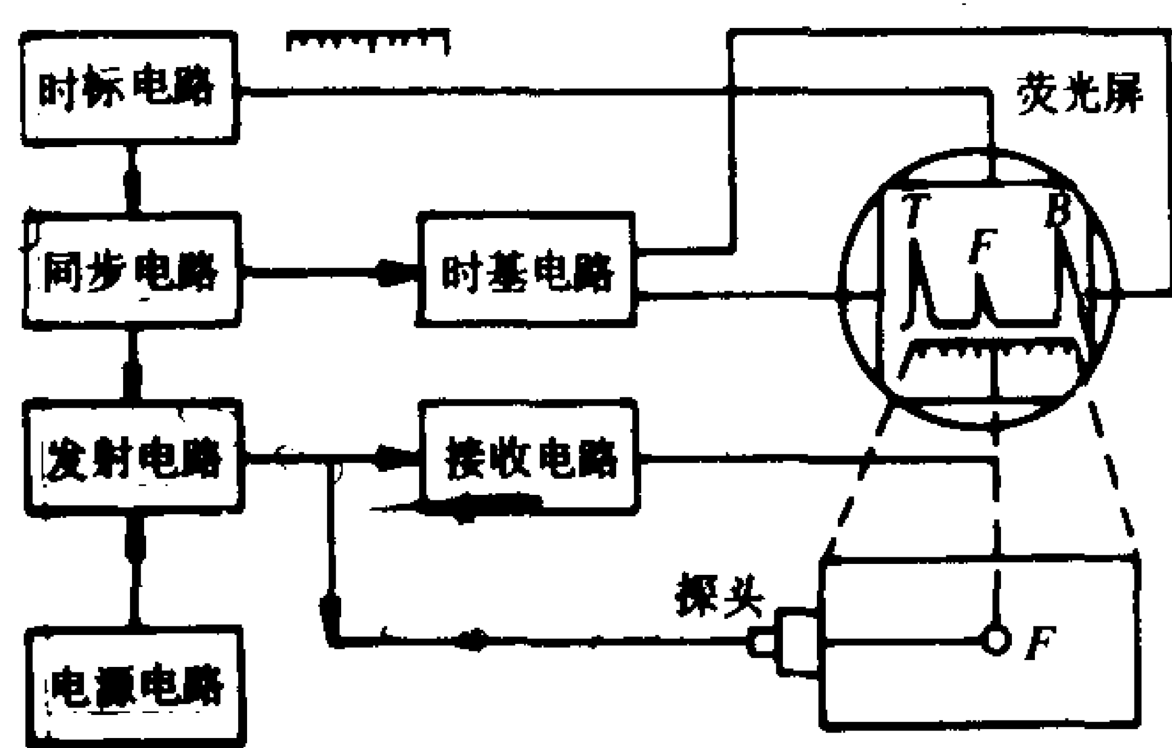


图 1.2.2-38　超声波探伤仪原理方框图

(2)探伤仪　探伤仪由示波管和各种晶体管、电子管和集成电路组成。

图 1.2.2-38 为脉冲反射式探伤仪的原理方框图。同步电路产生周期性的同步尖锐触发脉冲信号，分别触发时间扫描电路和高频脉冲发射电路。时间扫描电路产生锯齿波电压，使示波管产生水平扫描线；高频脉冲发射电路产生电脉冲作用在探头晶片上而激发超声波，超声波经耦合剂射入工件，在遇到缺陷或工件界面时便反射到探头晶片而转变为电信号输入到接收放大器，信号经过放大、检波、抑制后，在示波管上显示出相应的回波信号。

2)探伤方法　超声波探伤的方法主要有穿透法、共振法和脉误反射法 3 种，常用的是脉冲反射法。

图 1.2.2-39 为脉冲反射纵波探伤原理图。直探头垂直作用于工件表面。超声波垂直射入工件内，遇到声阻抗不同的界面（如缺陷F或工件底部）就产生反射，并被探头晶片所接收，转变成电信号，经放大在荧光屏上显示出始波、缺陷波和底波。缺陷面积大，反射波强，脉冲幅度也高，易于探出平行于探测面的缺陷。根据波形位置高低，可方便地测定出缺陷位置和估算出缺陷大小。此法操作简单，易于掌握。

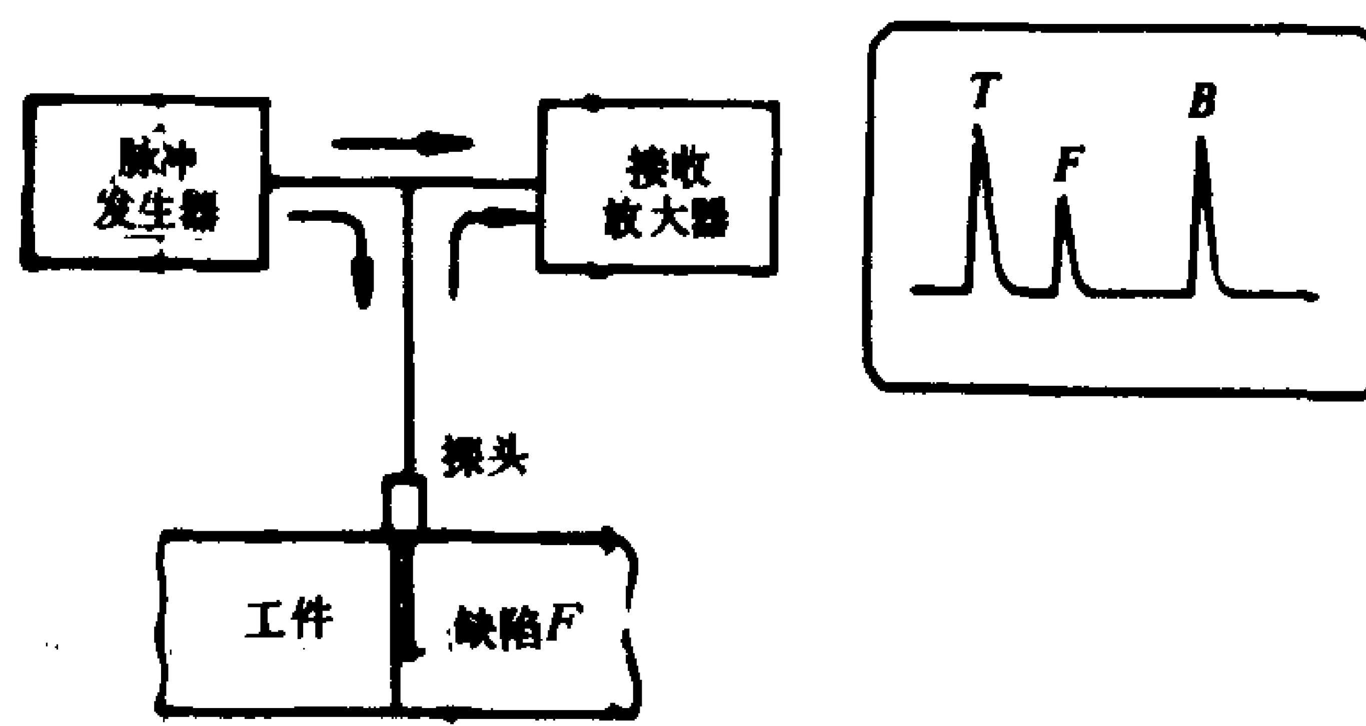


图 1.2.2-39　脉冲反射纵波探伤原理图

此外，还可以利用斜探头将波形转换成横波入射工件。这种横波主要用于板材、管材、焊缝内部和表面缺陷的探伤，因横波速度只有纵波的一半，波长短，发现缺陷灵敏度高．分辨率也好。在直探头无法探到的（垂直于探伤面的）缺陷可以用横波探出。

超声波探伤时，工件的探测面上不得有氧化皮和锈蚀等，其表面粗糙度一般不大于Ra 3.2 μm，工件探测面和探头之间应涂有耦合剂(如油、水或甘油等)，以减少声波界面间的损耗。

7.5　磁粉探伤

磁粉检测是工业部门应用较早和较广的一种无损检测手段。它可以发现铁磁材料表面和

近表面的各种缺陷，诸如发纹、裂纹、气孔、夹杂、折叠等。

当铁磁材料被磁化时，如果材料表面或近表面存在某些缺陷，那么这些缺陷将破坏材料磁性的连续性。在这些缺陷所在的部位将产生漏磁场。若能采用某种物质（如吸附磁粉）或某种仪器探测到漏磁场的存在，那么就能探测到缺陷的所在；因此，利用铁磁材料的磁性变化所建立的检测方法，统称为磁性检测或磁力检测。而根据探测漏磁场的方式，磁力检测又可分成：磁粉法、探测线圈法、磁场测定法和磁带记录法。

7.5.1 探伤原理

在磁介质的分界面上，磁力线将产生“折射”，特别是当磁力线在磁导率很大的铁磁材料与空气（或非磁性材料）的界面“折射”时，磁力线几乎与界面平行，这时漏到空气中的磁通很少。如果在铁磁材料的表面或近表面存在某种缺陷，如裂纹、气孔、非磁性夹渣等，特别是表面开口裂纹时，由于“折射”性质，使磁力线路径改变而大量地漏到空气中，从而在缺陷处形成漏磁场，如图 1.2.2-40 所示。漏磁场能够吸附磁粉而显示出缺陷的位置和形状。由于铁磁材料的磁滞特性，当外加磁场取消之后，在缺陷处仍有一定的剩余漏磁场，它同样可以吸附磁粉。

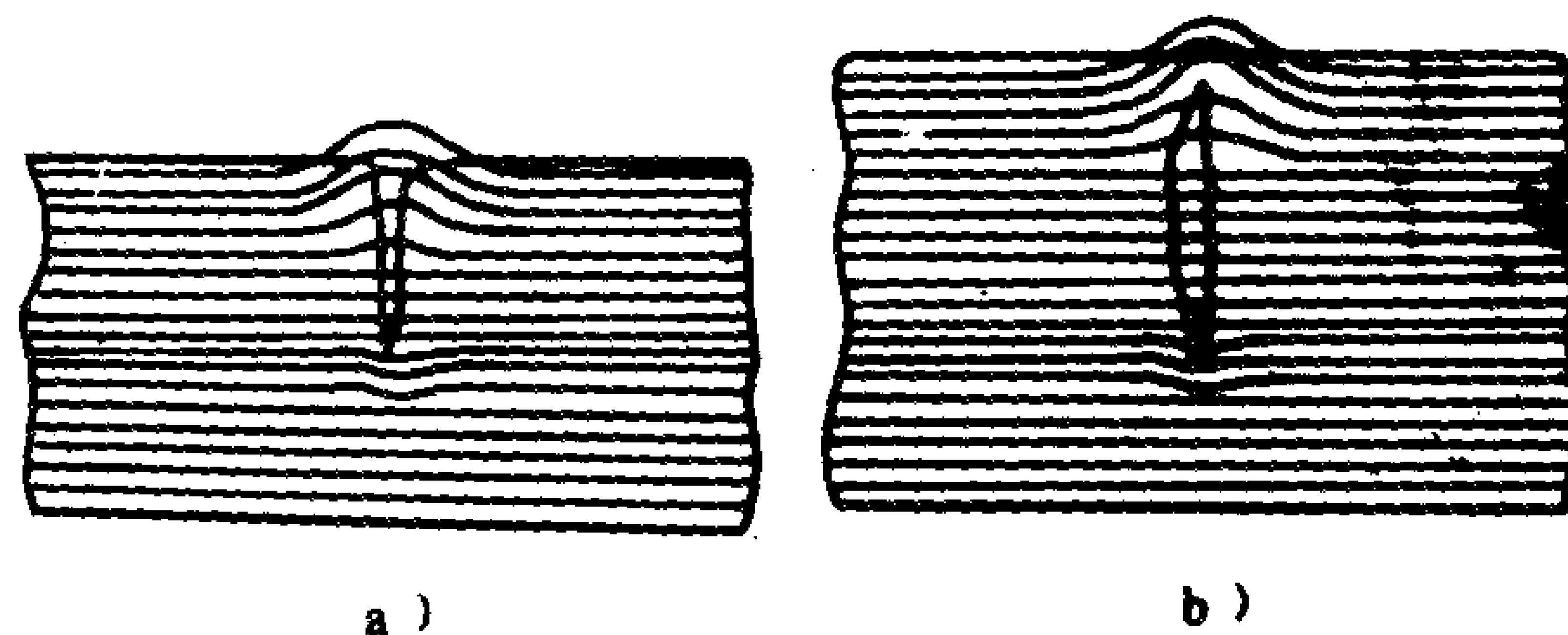


图 1.2.2-40 漏磁场示意图

7.5.2 探伤工艺

1）磁化方法 零件的磁化方法通常有周向磁化、纵向磁化和复合磁化 3 种。周向磁化是对零件进行圆周方向磁化；纵向磁化是使零件沿纵向磁化；复合磁化是使零件在两个或三个方向同时磁化。磁化零件时有多种通电方式，这些通电方式分别适用于对不同尺寸或形状的零件进行不同方向的磁化。

磁化方法要根据被测零件的磁性、形状、尺寸和预测的缺陷性质来选择。要尽可能使磁场方向与检测面平行，并且与预测的缺陷方向垂直。

2）磁化电流 交流电、直流电和整流电都能用于磁粉检测。但对于不同情况应有不同选择。交流电由于具有“集肤效应”，它所产生的磁场局限于零件的表面，因此它只能检查出扩展到零件表面的缺陷。直流电所产生的磁场可以渗到零件内部，因此可以检查出近表面的缺陷。

磁化电流值可以根据相应的计算公式计算求出。

3）磁粉及显示 零件表面及近表面的缺陷所生成的漏磁场，要用磁粉来显示。磁粉是经过加工具有一定形状和尺寸以及磁性和色泽的Fe_2O_3或Fe_3O_4粉末。

磁粉的施加方式有两种，一种是干法，即在零件表面撒上一薄层干的磁粉；另一种是湿法，即在零件表面浇上磁悬液，磁悬液中含有规定数量的磁粉。

漏磁场所吸附的磁粉构成磁粉痕迹，实际检验中，通过磁粉痕迹的特征分析与对应缺陷的金相剖析，找出对应缺陷的磁痕特征，作为判断依据。

零件在进行磁粉检测后，具有剩磁，须进行退磁处理。

7.6 涡流检测

7.6.1 涡流检测原理

如图 1.2.2-41 所示，在线圈中通以交变电流，就会产生交变磁场H_P。若将试件（导体 1）放在线圈磁场附近，或放在线圈中，试件在线圈产生的交变磁场作用下，就会在其表面感应出旋涡状的电流，称为涡流。涡流又产生一交变反磁场H_S，根据楞次定律，H_S的方向与原有激励磁场H_P的方向相反。H_P和H_S两个交变磁场叠加形成一个合成磁场，使线圈内磁场发生变化。当线圈在工件上移动时，工件表面的裂纹会使涡流绕过裂纹或在裂纹下方通过，从而使线圈的感应量改变，这种变化可以通过仪表或其它仪器测出并显示。

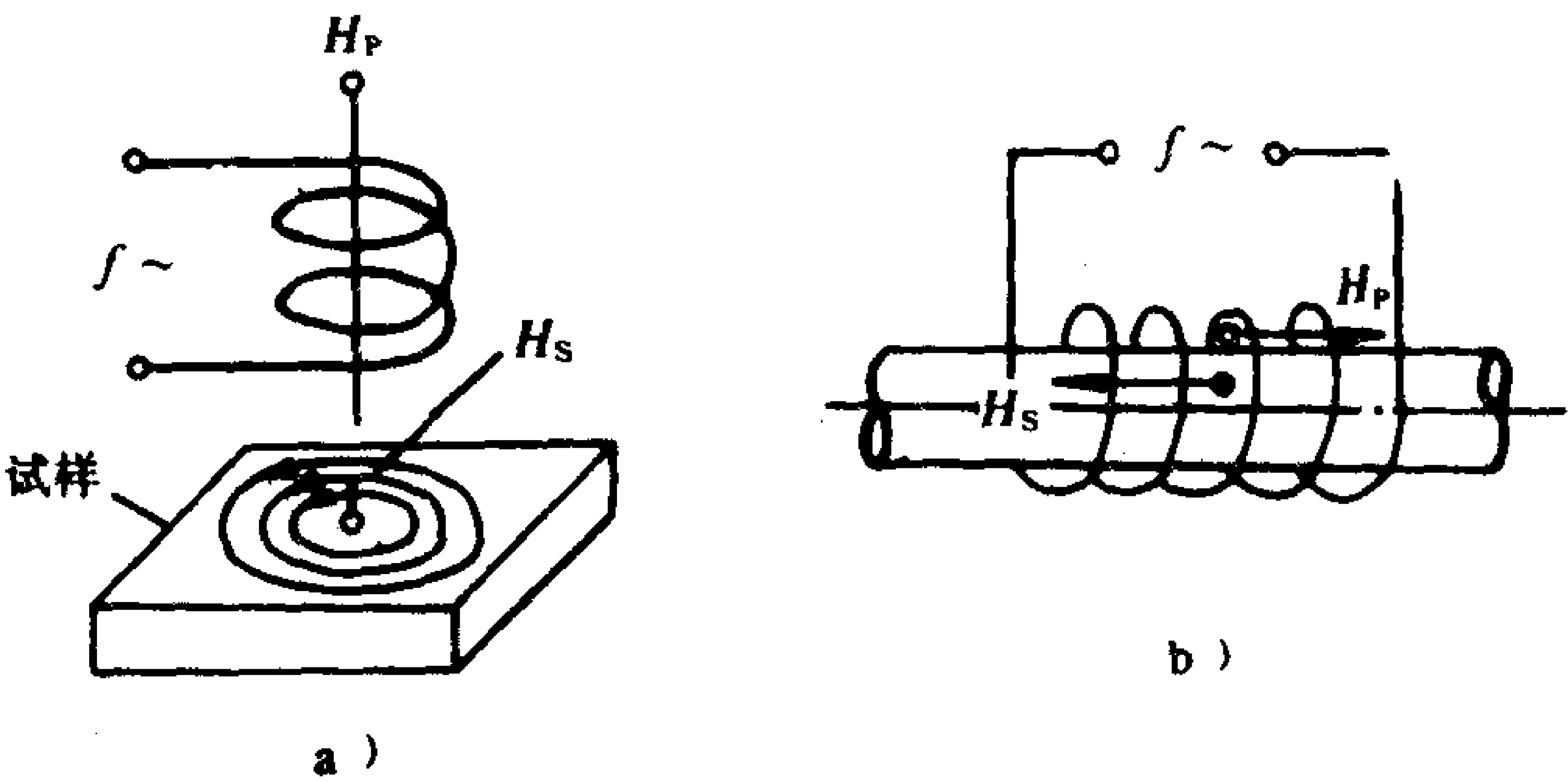


图 1.2.2-41 涡流检测原理图

a)探头线圈放置于试件上；
b)试件放置于线圈内；
H_P-线圈在未放试件时的初级磁场；
H_S-试件中由涡流产生的次级磁场

涡流检测的优点是：适用范围广，灵敏度高，不接触工件，并且可用于高温检测。其缺点是：不能检测距表面较深的缺陷，影响涡流的因素多，不适于检测复杂零件。

7.6.2 涡流检测仪

涡流检测仪由探头和信号显示装置所组成。探头是一个检测线圈，振荡器产生频率不同的交变电流通入检测线圈，便产生激励磁场，使试件产生涡流，涡流又产生反磁场。由于涡流磁场中包含各种缺陷信号，探头可以收集缺陷信号并转变为电信号而输入信号显示装置。电信号经过放大器放大后，通过信号处理器检出有用的缺陷（裂纹）信号并以直流形式输至显示器显示或接入记录器予以记录，如图 1.2.2-42 所示。

7.7 射线探伤

7.7.1 基本原理

射线探伤是利用各种物质对射线有不同的吸收或衰减作用来实现的。各种物质对射线都有吸收作用，一般来说，密度较大的物质吸收得多，密度小的物质吸收少。当射线通过金属零件时，如果其内部存在缺陷(如气孔、夹渣等的密度都比材料本身的密度小)，那么这一部分对射线的吸收就比其它部分小

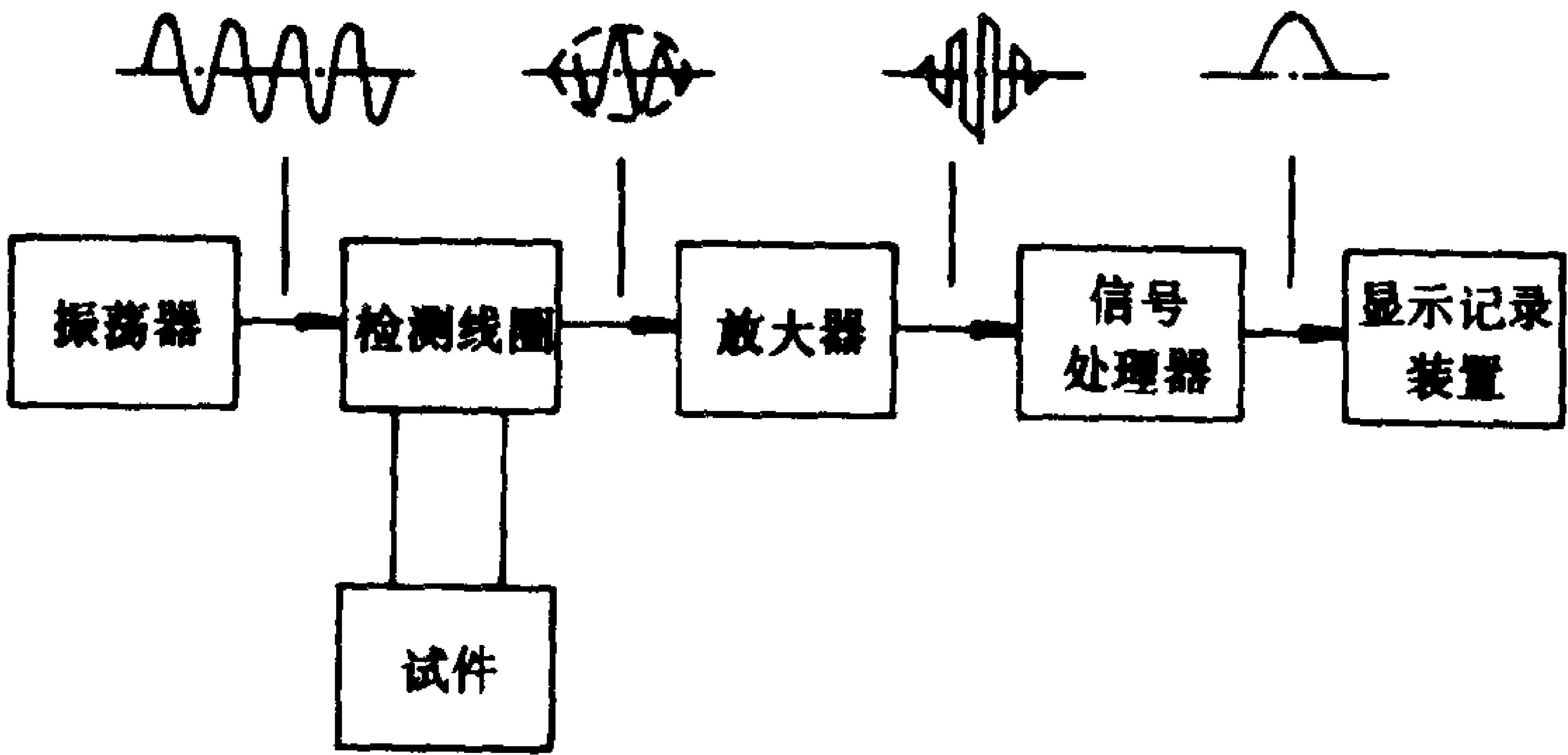


图 1.2.2-42 涡流检测仪信号处理方框图

些，即通过的射线要多些。通过一定方式将这种不均匀的射线强度进行照相或转变为电信号指示，记录或显示，就可以评定被检测试件的内部质量，达到无损检测目的。

射线探伤适用于零件内部探伤；能够检查金属和非金属材料；发现缺陷的灵敏度高；缺陷位置、形状、大小可在胶片上显示；穿透力强，但是探伤的操作复杂，对人体有一定的伤害，使用时必须注意安全保护。

射线探伤方法主要有透视照相法、电离检测法、x射线荧光屏观察法和电视观察法以及x射线计算机层析摄影等。

7.7.2 x射线照相探伤

照相法是利用射线感光材料(通常用射线胶片)，放在被透照试件的后面接受来自透过试件后的强度不同的射线，如图 1.2.2-43 所示。因为射线强度与胶片乳剂的摄影作用在正常条件下成正比。因而胶片在射线作用下形成潜影，经暗室处理后，就会显示出物体的结构图像。根据底片上影像的形状及其黑度的不均匀程度，就可以评定被检测试件中有无缺陷及缺陷的性质、形状、大小和位置。此法的优点是：灵敏度高、直观可靠、重复性好，是射线检测法中应用最广的一种常规方法。

x射线探伤机是以x射线管为射线源的探伤设备。x射线探伤机，按轻便程度可分为携带式和移动式两种。携带式仪器，主要用于现场检测，其功率要求不很大，但要求轻便可靠。移动式仪器多用于室内，要求设备可靠、多功能和高效率。

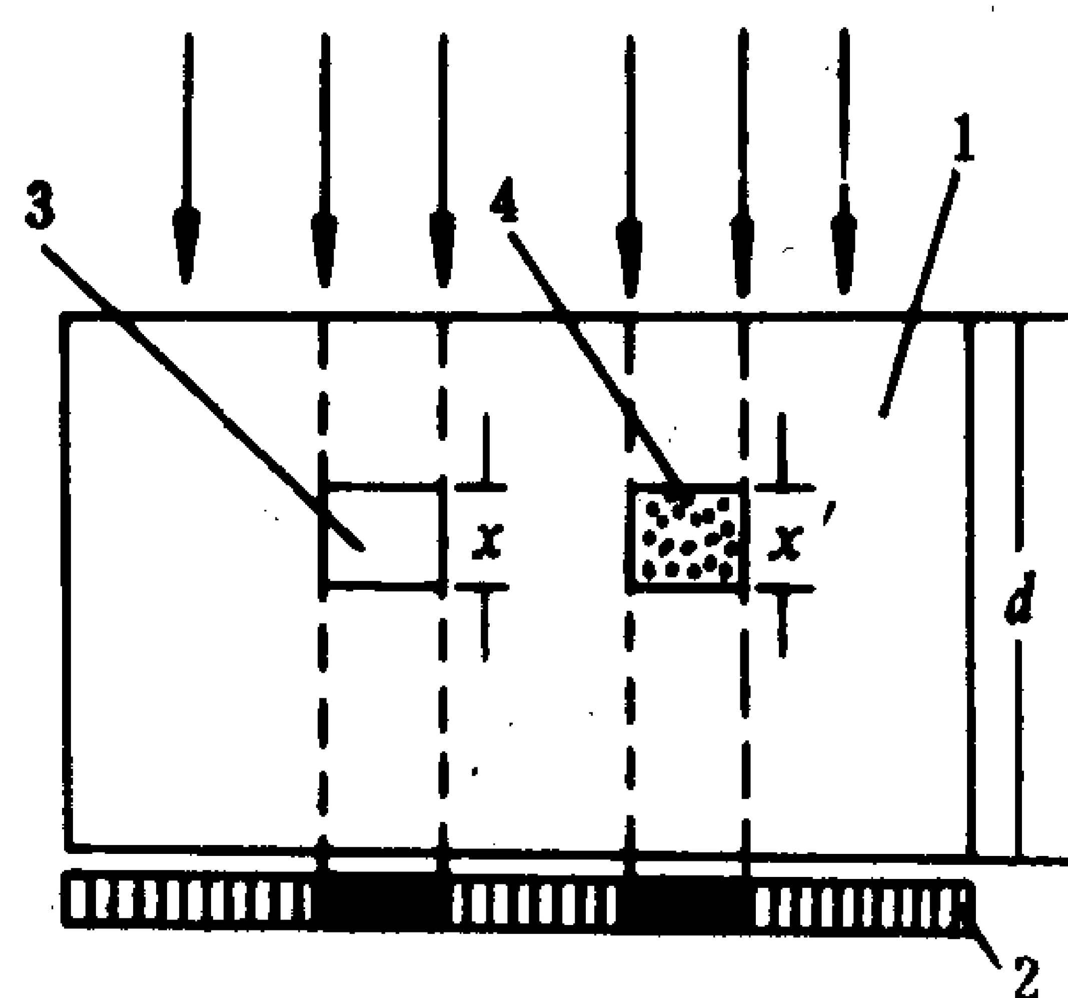


图 1.2.2-43 x射线照相原理图

1-试件；2-感光胶片；3-缺陷（气孔）；4-缺陷（夹渣）

x射线探伤机由x射线管、高压发生器、控制系统和冷却系统组成。x射线管是一个保持一定真空度的二极管，在管的两端施加高电压后，由阴极钨丝放出的自由电子就在x射线管中高速撞击阳极靶而产生x射线。高压发生器由高压变压器、电容器和整流器组成，它的作用是产生高电压加速阴极热电子流以轰击阳极靶而产生一定波长的x射线。控制系统包括高压调节、管电流调节、各部分电路的接通与切断、工作指示和保护装置等。

x射线照相探伤适用于铸件、焊接件，以及非金属复合材料的质量检查。可发现铸件中的气孔、夹渣、疏松、针孔、偏析、裂纹、冷隔、欠铸和缩孔、焊件中的气孔、夹渣、裂纹、未焊透、烧穿和焊漏等缺陷。

7.8 温度测量

7.8.1 概述

机械零件和结构件的温度变化往往与机械工作状态发生的变化有关。因此，温度测量可以作为机械工况监测的手段之一。

按测量方式来划分，温度测量分为接触式和非接触式两大类。

接触式温度测量，即测量元件与被测对象有良好的热接触，通过传导和对流达到热平衡进行温度的测量。接触式测量可以测量物体内部的温度分布，但对运动体、小目标或热容量小的对象，测量误差大。

非接触式温度测量，即测温元件与被测对象不接触，通过接收热辐射能量实现测温。由

于非接触式测温仪不会破坏被测对象的温度场，不必与被测对象达到热平衡，仪器温度可大大低于被测介质温度，测温上限不受限制，动态特性较好，可测运动体、小目标及热容量小或温度变化迅速的对象表面温度，也可测温度场的温度分布。但由于它易受物体的辐射率，周围环境状况的影响，高精度的测温受到限制。

温度测量方法的选择主要取决于使用目的，如温度范围、精确度、测量路线和环境条件等。

接触式温度测量所采用的玻璃水银温度计、双金属温度计、压力式温度计、热电偶温度计、热电阻温度计以及半导体温度计，在表 1.2.1-9 中已有介绍。

7.8.2 示温涂料法

示温涂料法是利用某些物质的颜色具有随温度的变化而变化的特性来测温的。这是一种测量机械表面温度的简便方法。

示温涂料法有示温带和示温笔两种，示温带有条形自粘带和自粘圆片两种，条形带上有若干个白色圆圈，每个圆圈均对应某一温度。将条形带子粘在机械的测温部位，当温度达到了带上指示的某个温度时，某一个白圈的颜色即变黑，以后即使温度再降低，黑色仍保持不退。这种变色过程几乎是立即发生的，其准确度约为指示温度值(以℃计)，的$\pm 1\%$，带子和粘结剂均有防水和防油的性能。自粘式圆片可以方便地粘在各种材料上。其作用方式和条形带相同，但是，每种自粘示温圆片只能反映某一个温度值。

示温笔可以粗略地测定表面温度。用示温笔在被检查的表面上画一道线，然后，准确无误地记下颜色发生清晰变化时所需的时间。如果变色的时间在 1 ～ 2 s以内，说明表面温度已达到了示温笔的标定使用温度。如果颜色变化的时间更短，说明表面温度高于示温笔的标定温度，而当颜色的变化速度较慢时，则说明表面温度较低。温度和变色间隔时间有一定对应关系。

7.8.3 红外测温仪

红外测温仪，又称红外线温度传感器。是近年来发展较快的新型测量仪表。由于它具有体积小，重量轻，携带方便，灵敏度高，响应快，操作简单等优点，很适宜于现场设备的温度检测用。

红外测温仪以检测物体红外线波段的辐射能来实现测温，是辐射法测温的主要仪表。它的工作原理是：被测物体发出红外线，通过透镜聚焦后入射到红外探测器上，在红外辐射的作用下产生一个正比于辐射能量的电信号，这个信号由放大器放大并进行处理，在显示器上显示温度值。红外探测器有热敏式和光电式两类。前者是利用物质受红外辐射而变热的热效应作用，后者是利用物体中电子吸收红外辐射而改变运动状态的光电效应作用，后者比前者的响应时间要短得多，一般为微秒级。

7.8.4 热辐射温度图象仪

热辐射温度图象仪是利用物体热辐射特性，对被测物体平面，空间温度分布以图象表现的测温设备，虽然在个别情况下，图象测量精度较差，但就相对温度而言，图象所得的综合价值要比绝对温度测量高。

目前热辐射温度图象仪（简称热象仪）以红外热象仪居多。红外热象仪是在红外探测器的基础上，用光学扫描方法顺序扫视整个被摄景物空间，经过转换而在显示器上得到可见的图象。用红外热象仪检查分析运行中设备技术状态查明故障是很有效的。这种仪器价格昂贵，推广应用受到限制。

参考文献

〔1〕四川省机械工程学会设备维修专业委员会编译：机器可靠性，四川人民出版社，1983

〔2〕J·A. Collins: Failures of Materials in Mechanical Design, John Wiley & Sons, 1981

〔3〕胡廉，龚杲荪：机械加工中动态测量，机械工业出版社，1985

〔4〕丰田利夫著 高克勲 李敏译：设备现场诊断的开展方法，机械工业出版社，1985

〔5〕Measuring Vibration, Brüel & Kjær, 1980

第3章　轮机维修技术基础

1　机械维修理论和维修方式

1.1　机械维修基础理论和应用技术

1.1.1　机械维修的基础理论

船舶机械设备，在使用过程中会发生磨损、疲劳、腐蚀、变形、断裂等损伤现象，通称为零件的失效。机械零件失效机理可称之为机械维修的基础理论。因为，只有对机械设备或零部件在使用过程中技术状态的变化和失效机理作出深入分析之后，才能制订出合理的修理制度、修理方式和修理工艺方法，以及有效地预防早期损坏和对已经损坏的机械进行有效修理。

摩擦学是研究机械零件失效机理的重要理论基础之一。

1.1.2　机械维修的应用技术

研究机械零件失效机理，有利于制订合理的维修制度、方式和工艺方法；而对失效机械零件施行有效的修复，则应研究各种维修的应用技术。机械维修应用技术包括如下两大部分：

1)修理组织，包括修理体制、修理制度、生产管理等方面。将现代管理科学应用于轮机维修生产组织，能获得显著的经济效益。

2)修理工艺，包括对机械故障、损伤的检测与诊断，和各种修复工艺方法。

机械故障检测与诊断是一门新型学科，由于它在机械设备监控及检测中的应用，使机械维修面目一新，并获得了显著的效益。不解体检测及诊断，使设备停机修理时间大大地减少，延长了修理间隔期和降低了故障率。在船舶机械的维修中，故障检测与诊断技术已开始应用，如应用声振特性监测柴油机及其它旋转机械的故障，应用铁谱技术监测发生机轴与轴承、缸套活塞环等摩擦部件的磨损状态等等。

在修复工艺方面，旨在提高修理质量、延长使用寿命和降低修理成本的各种新工艺、新技术及新材料，不断地研究成功和应用。如等离子金属喷涂(焊)、大型轴类零件刷镀、快速镀铬、常温镀铁、胶合修补等等。

1.1.3　机械维修经济

机械维修生产属于经济活动范畴，它必须受经济规律的制约。一台机械设备或一个零部件，何时修和怎样修，是修还是更新，应进行经济分析，综合其技术经济效果决策。70年代在国际上兴起的一门新学科—"设备综合工程学"，是研究机械设备从规划设计、使用、直至报废全过程的寿命周期费用最经济的科学，80年代初引入我国。国务院1987年7月28日发布的《全民所有制工业交通企业设备管理条例》规定，企业设备管理的主要任务，是对设备进行综合管理。对设备进行综合管理是吸收了"设备综合工程学"基本观点所制订的方针。

提高机械设备维修的经济性，已作为研究机械设备维修的指导原则。对维修经济的研究目前包括以下3个方面：

1)对设备综合工程学的研究，即对机械设备从规划、设计制造（或选购)、使用、维护、修理、改造更新或报废全过程的技术—经济分析，以期达到设备的寿命周期费用（包括：购

置费、使用费、维修费等）最经济为目标。

2)对机械设备可靠性的研究，即对设备系统或零部件在规定的使用时间内和使用条件下，能正常发挥其规定的技术性能的研究。可靠性技术已有30年的研究历史，但在机械工程中的应用尚属起步阶段。

3)对机械设备维修性的研究，即研究在一定的条件下维修机械设备时，该设备能适应维修技术条件的能力，包括：机械设备的易诊断性、可接近性(维修时可接近的难易程度)、安装单元的整体性（易于进行部件的维修或更换)、互换性、零件的易修复性和维修的安全性，等等。机械的维修性研究，对于在机舱内修理主、辅机及其它设备甚为重要。

1.1.4 机械维修学体系

“机械维修学”，是目前正在形成的一门新型学科。它包括维修基础理论、维修应用技术和维修指导原则3大部分，每部分都有一定的研究范畴和具体内容，从而形成了机械维修体系，如框图1.2.3-1所示[16]。

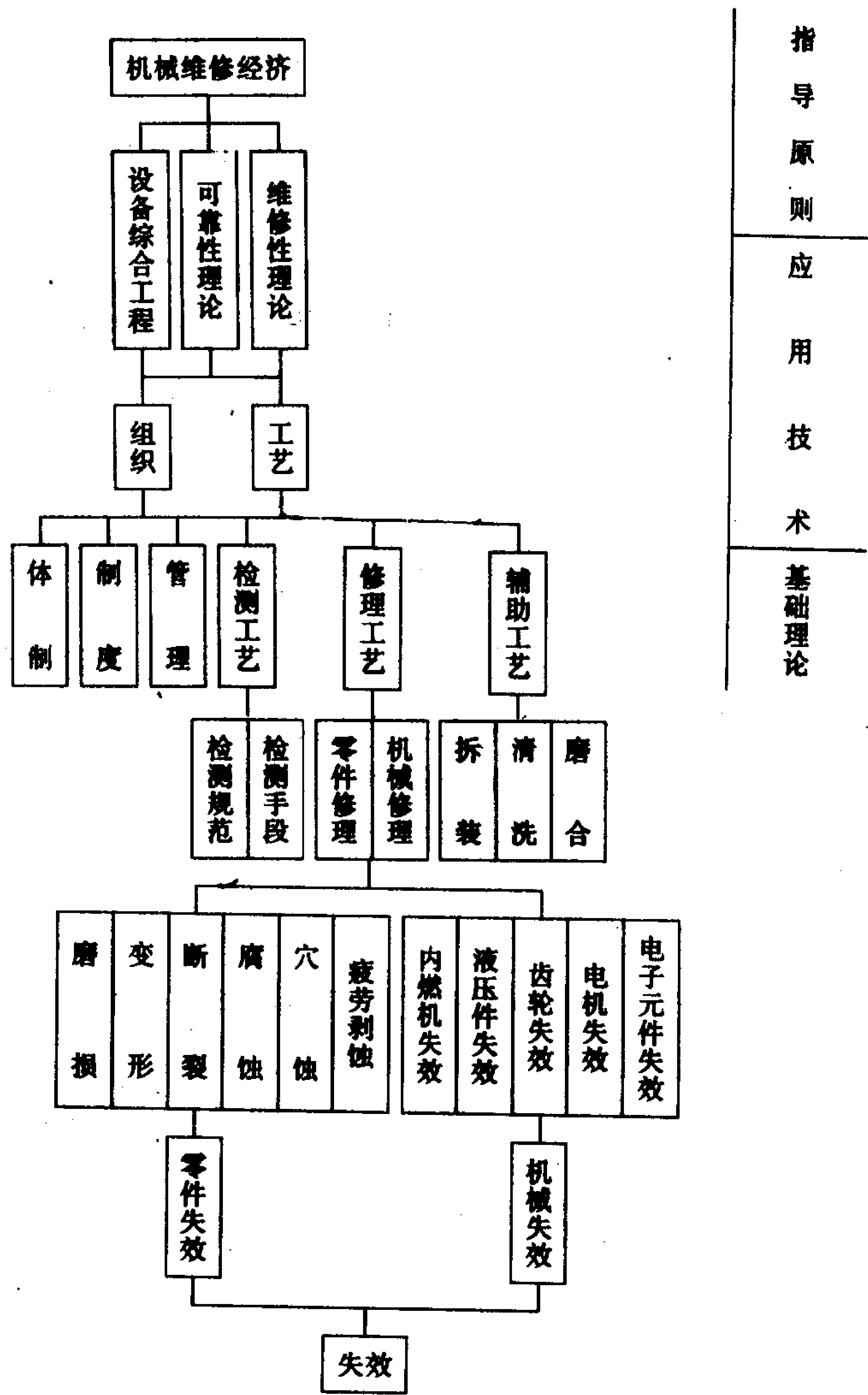


图1.2.3-1 机械维修学体系框图

1.2 维修思想

1.2.1 传统的维修思想

传统的机械维修思想可概述为：机器设备的完好性与组成的各个部件、零件、系统等的可靠性紧密相关，而零部件及系统的可靠性总是随时间而降低的，故应对设备及其部件、零件及系统确定使用寿命，并按规定的寿命期进行设备的全部或部分的修理。这就是定期检修，或称为计划预防修理。

这种维修思想的理论基础是“浴盆曲线”（详见本章第2节）。

1.2.2 以可靠性为中心的新维修思想

从60年代起，对新的维修思想作了许多的探索，可归纳为如下要点：

1)机械设备的可靠性和安全性，是在设备设计制造时已确定的固有性能。有效地修理只能保持原有性能，而不能提高；不正确的修理反而会使设备的可靠性降低。

2)对于复杂的机械设备，除了磨损故障外，浴盆曲线一般是不适用的。因此，对这类设备固定修理周期是不必要的。实践证明，过多的修理并不能获得使人满意的可靠性水平，且往往在修理后投入使用的开始阶段故障率有明显的上升。

3)机械设备出现故障是不可避免的，良好的设计不是消除发生故障，而是在发生故障时减少其危害性。

4)应采用监测手段，包括有效的数据采集与处理系统，以监测设备重要部位的技术状态。

5)维修工作必须针对机械设备实际的技术状态，分析影响该设备可靠性的各种因素，以确定最有效、最合理的维修制度、维修方式和方法。

1.3 维修方针

维修方针，主要是指对维修工作的一些原则规定和技术政策。制订维修方针的出发点如下：

1)维修应达到的目标，必须使所维修的设备的可靠性达到一定的水平。

2)维修应考虑经济效果，必须保证在维修设备时，在人力、物力和时间上的消耗为最少。

维修方针应包括维修管理工作和维修技术工作的原则和政策。如合理规定维修的组织结构（体制）、维修人员的水平和培训等等内容。

1.4 维修制度

机械设备的维修制度，在各个国家里对各类设备都有不同的规定。例如，我国数量最多的金属切削机床，其维修制度规定为：日常保养、一级保养、二级保养(小修)、中修或项修、大修等级别，并对各级修理的范围、修理时间和间隔期、以及验收要求都作了规定；对船舶机械的修理，一般分为：预防检修、小修、中修和大修，预防检修又分为航次检修和停航检修。对上述各级修理的范围、修期和修理间隔期也有具体规定。

1.5 维修方式

维修方式主要是指对机械设备的维修时机的控制。在长期生产实践的基础上，对维修方式作了如下的划分。

1.5.1 事后维修

事后维修，常指对机械设备使用到发生故障或损坏时才进行修理。这是一种既古老又落后的维修方式，它产生于技术十分落后的时代。目前虽已落后，但对于简单设备、低值设备和利用率很低的设备，即因故障停机也不致影响生产的设备，也有采用。

1.5.2 定时维修

定时维修又称计划预防维修，是指对机械设备规定固定的修理时期和修理范围。这种修理方式一般不考虑修理对象的具体技术状态，而只控制规定的修理时期，其优点是修理日期和范围明确，便于制订修理计划和组织生产。但对于较复杂的机械设备，因其可靠性的降低并不一定与使用时间有明显的比例关系，故难以合理地规定应修理的时机，而往往会造成“过剩修理”，限制了设备或零部件发挥最大效用，造成人力和资源上的浪费。

这种维修方式目前应用较广。对于已经掌握了设备磨损规律，和平时不能轻易停机进行检修的生产线上的主要设备及动力设备是适用的。

1.5.3 视情维修

视情维修又称状态监测维修，是指根据机械设备的实际技术状态来控制修理时机。采用这种维修方式的条件是，修理对象本身具有某些能表征其技术状态，并可测量的技术参数，且具有对这些技术参数能适时地进行测量和控制的手段。此外，对这些技术参数还应有明确的衡量准则或标准。显然，这种维修方式是依靠对机械的故障发展过程不断地监测和定量分析来确定最佳的修理时期，在故障发生之前，能将存在潜伏危险的零部件进行更换，故是一种新的预防修理方式。

这种维修方式由于进行状态监测要花费一定的费用和需要一定的精密测试设备，故适用于利用率较高的重要生产设备和生产线上的主要设备。

除上述 3 种维修方式外，还有其它的一些方式。因每种修理方式都有其适用范围，应根据生产特点、机械设备的特点和使用条件，选择最适宜的修理方式。

2 机械零件的摩擦、磨损和断裂失效

机械零件由于某种原因丧失它应有的功能时(如承受载荷、传递力或能时)，或因受严重的损伤不能安全可靠地继续使用，需要立即修理或拆换的，统称为失效。根据零件丧失功能的原因，可将失效的类型分为三种：表面损伤失效、断裂失效和过量变形失效。

1)表面损伤失效。主要是由于摩擦零件表面的磨损超过零件规定的极限尺寸，表面的接触疲劳、气蚀和腐蚀等产生的表面损伤失效。

2)断裂失效。由于过载、疲劳、超温和环境等引起机件断裂失效。

3)过量变形失效。由于外加应力超过了材料的弹性极限或高温蠕变引起过量变形而失效。

在失效的零件中，因磨损需要修理或更换的占第一位。零件断裂失效的后果最严重，不仅经济损失大，而且往往导致人身伤亡，发生灾难性的事故。

2.1 机械零件的摩擦

任何机械零件相互摩擦时，必然产生磨损。如欲减少磨损延长机器使用寿命，则必须了解和研究零件的摩擦状况和磨损机理及类型，采取相应的措施。摩擦副零件的表面状态、工作条件、润滑情况、材料的匹配等，对其磨损影响极大。

2.1.1 摩擦理论

1699年阿蒙顿 (G. Amontons) 和1785年库伦 (Coulomb) 等学者对于摩擦进行了比较系统的实验和研究，揭示了摩擦的性质，并总结出了实验定律，一般称为古典摩擦定律或库伦定律。以后又出现了机械啮合理论、分子理论、分子机械理论和粘着理论等。由于科学技术的发展，摩擦理论逐步得到补充和完善。

1)古典摩擦定律

古典摩擦定律的内容可归纳如下[1]：

（1）摩擦力与作用于摩擦表面的法向载荷成正比：

$$F=fW \tag{1.2.3-1}$$

式中：F——摩擦力；

f——摩擦系数；

W——法向载荷。

（2）摩擦力与名义接触的面积的大小无关。

（3）摩擦力与滑动速度的大小无关。

（4）静摩擦力大于动摩擦力。

实践证明，古典摩擦定律适用于一定条件下的摩擦状况，故具有一定的局限性和不确切性。

2)机械啮合理论

机械啮合理论认为摩擦阻力是由于固体接触表面上的凹凸不平处的相互啮合而产生。机械啮合理论的摩擦模型，如图1.2.3-2所示。当表面A固定不动，表面B沿箭头方向滑动，相当于斜面的摩擦，其静摩擦系数和动摩擦系数为：

$$f_{静}=\mathrm{tg}\theta_s \tag{1.2.3-2}$$

$$f_{动}=\mathrm{tg}\theta_k \tag{1.2.3-3}$$

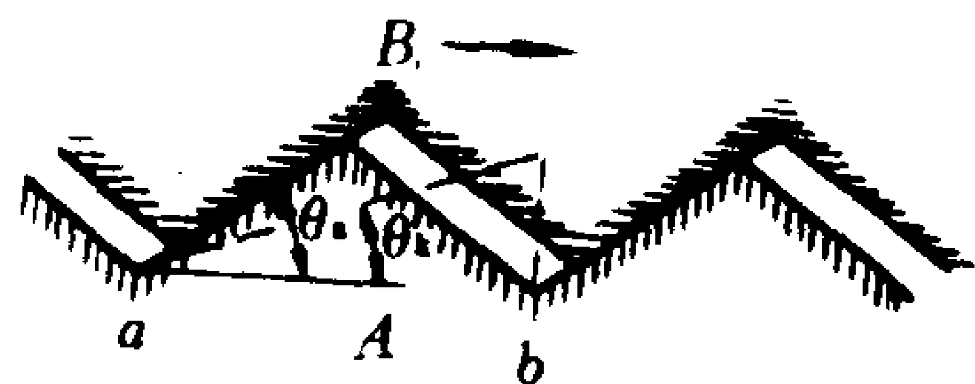


图1.2.3-2 机械啮合理论摩擦模型

3)分子理论

认为产生摩擦的真正原因是由于接触表面间的分子吸引力的缘故。所以，表面愈光滑，摩擦力就愈大。

4)分子机械理论

认为摩擦力是由于机械啮合作用和表面分子相互作用所产生的切向阻力的总和，一般用摩擦二项式定律来表示：

$$F=\beta W+\alpha A_r \tag{1.2.3-4}$$

$$f=\beta+\alpha\frac{A_r}{W} \tag{1.2.3-5}$$

式中：A_r——真实接触面积；

α，β——分别为摩擦表面的物理性质和机械性质所决定的系数。

5)粘着理论

简单的粘着理论是鲍登 (F. P. Bowden) 和泰伯 (D. Tabor) 于1945年提出的，后经修正发表了污染膜的粘着理论[2]。

（1）简单的粘着理论。认为当两表面相接触时，在载荷作用下，表面部分粗糙的微凸体顶端承受很大压力，而产生塑性变形并牢固地粘着和焊连，如图1.2.3-3所示。当表面相互滑动时，粘着点被剪断，产生摩擦力。此外，如两表面硬度不相同时，硬表面上的微凸体或外来硬颗粒楔入软表面，分别在对方表面上产生犁沟，引起犁沟的力也是摩擦力，故摩擦力

是前述两种阻力之和，即：

$$F=F_{jl}+F_{ll} \tag{1.2.3-6}$$

式中：F_{jl}——摩擦力中粘着点被剪切的阻力；

F_{ll}——摩擦力中的犁沟阻力。

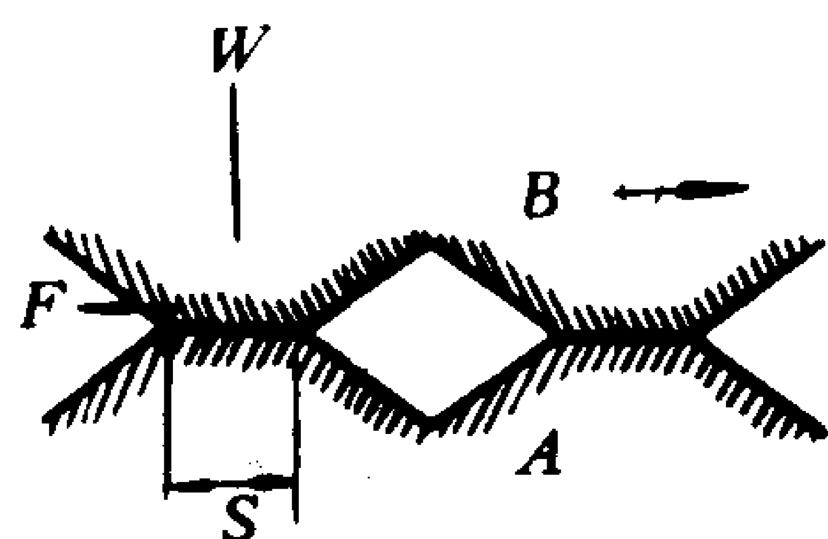


图 1.2.3-3 粘着理论的摩擦模型

对理想的弹塑性材料，F_{ll}只占全部摩擦力的百分之几，可以略去不计。

设粘着点的剪切强度为$\tau_{b'}$，则摩擦力为：

$$F=A_r\cdot\tau_{b'}=\frac{W}{\sigma_{sy}}\cdot\tau_{b'} \tag{1.2.3-7}$$

$$f=\frac{F}{W}=\frac{\tau_{b'}}{\sigma_{sy}} \tag{1.2.3-8}$$

式中：σ_{sy}——压缩屈服极限（较软金属）。

以上分析是建立在理想的弹塑性材料的基础上，如果忽略冷作硬化效应，上式中的$\tau_{b'}$即为两者中较软金属的剪切强度τ_b，则摩擦系数为：

$$f=\frac{\tau_b}{\sigma_{sy}}=\frac{\text{较软金属材料的剪切强度极限}}{\text{较软金属材料的压缩强度极限}} \tag{1.2.3-9}$$

（2）修正的粘着理论。简单粘着理论中，只考虑了法向载荷下的实际接触面积，而没有考虑两表面相对滑动时切向载荷引起的实际接触面积的增大，故对简单的粘着理论进行修正，即：

$$A_r^2=\left(\frac{W}{\sigma_{sy}}\right)^2+\alpha\left(\frac{F}{\sigma_{sy}}\right)^2 \tag{1.2.3-10}$$

式中：$\frac{W}{\sigma_{sy}}$——简单粘着理论中由法向载荷作用形成的实际接触面积；

$\alpha\left(\frac{F}{\sigma_{sy}}\right)$——由切向力引起的增大的实际接触面积。

（3）金属表面有污染膜时的粘着理论。在大气中的金属表面覆盖着一层氧化膜或污染膜。因此在这种情况下的摩擦，实质上是氧化膜对氧化膜的摩擦，只有在氧化膜破坏后，才发生金属与金属的摩擦。表面有污染膜时的摩擦系数为：

$$f=\frac{F}{W}=\frac{\tau_f\cdot A_r}{\sigma_s\cdot A_r}=\frac{C}{[\alpha\ (1-C^2)]^{1/2}} \tag{1.2.3-11}$$

式中：τ_f——污染膜的剪切强度极限；

σ_s——压应力；

α——待定系数；

C——系数（一般$C<1$）。

当$C\to1$时，$f\to\infty$，相当于在真空中金属表面无污染膜时的摩擦。$C<1$时，表面存在污染膜，摩擦系数很快下降。当C值很小时，摩擦系数可简化为：

$$f=\frac{\tau_f}{\sigma_{sy}}=\frac{\text{表面污染膜时的剪切强度极限}}{\text{基体金属微凸体压缩屈服极限}} \tag{1.2.3-12}$$

2.1.2 零件表面的组成

机械加工后的零件表面层的组织与结构和基体金属不相同，它对零件的摩擦和磨损有密切关系。因为实际的磨损仅仅发生在零件的表面层。图 1.2.3-4 是零件表面层的组织结构。

最外层为一般的污染层，由于指接触的油污或尘埃等组成。其次是吸附气体层，由大气中的液体或气体分子吸附而成。第三层为金属氧化层，是金属表面与空气中的氧化合而成。毕氏层是切削加工中分子层熔化和表面塑性流动所产生。毕氏层的下面为加工硬化层，亦即变形硬化层。加工方式不同，变形程度也不相同，可分为强烈变形层、严重变形层和轻微变形层几种。零件表面的氧化层在零件摩擦时，可避免金属的直接接触，减少粘着磨损。

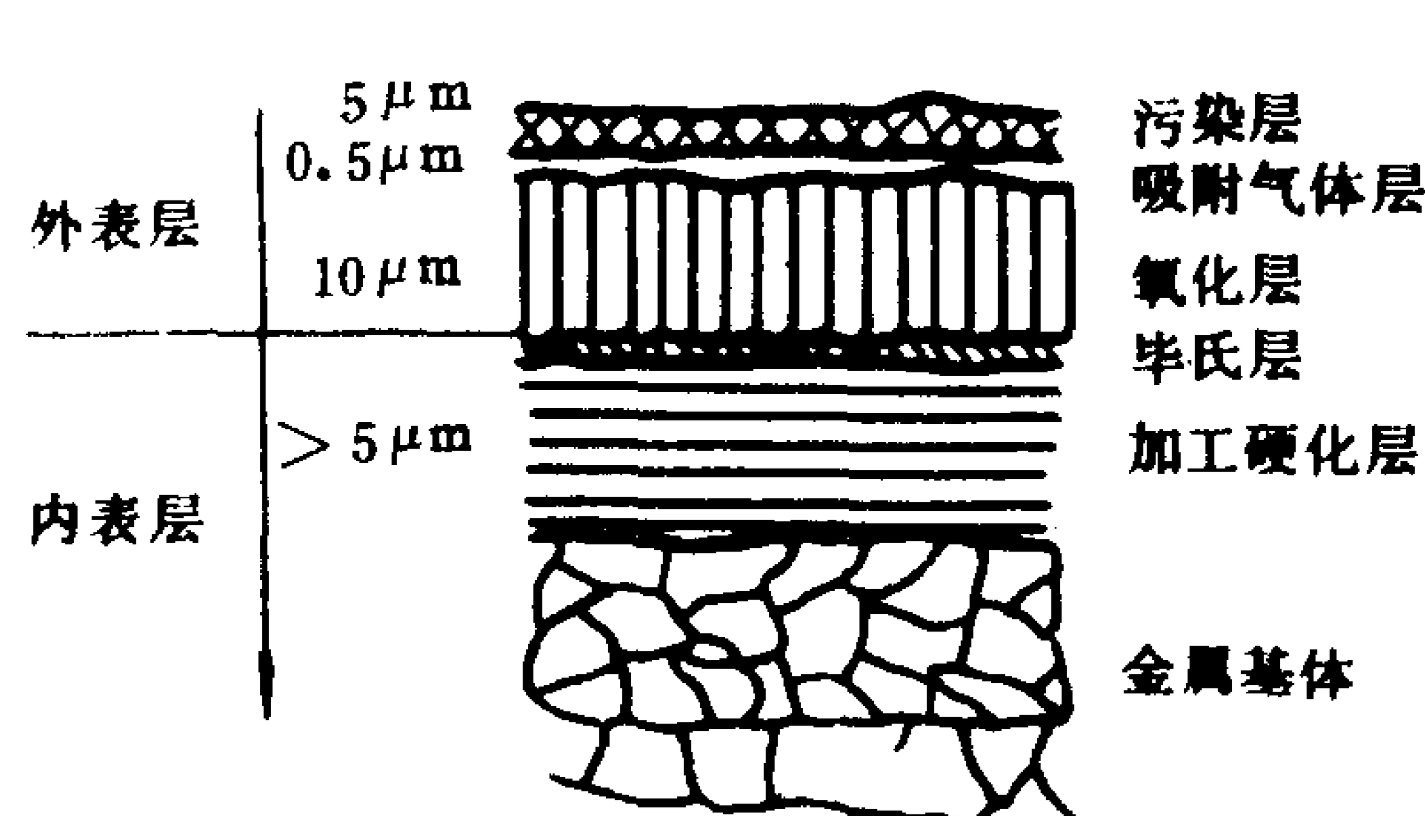


图 1.2.3-4　零件表面层的示意图

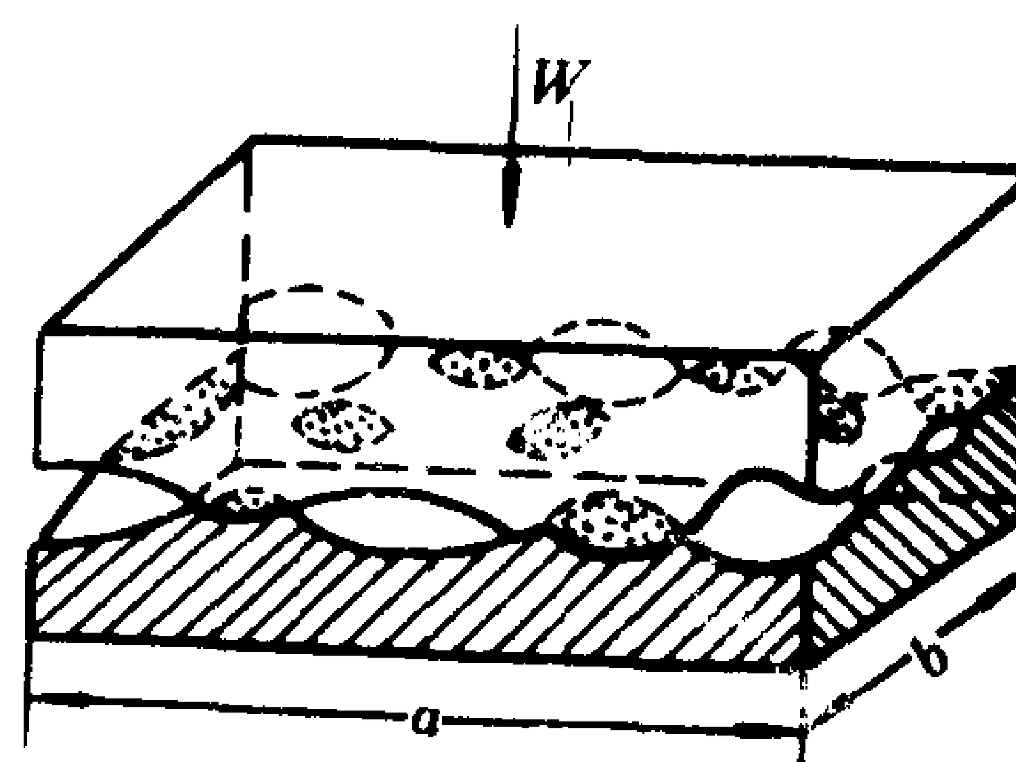


图 1.2.3-5　粗糙接触的表面积

2.1.3　零件表面的实际接触

零件的摩擦表面存在着许多凸峰和凹谷。两个表面相接触时，只能是某些微凸体的相互接触，不可能是整个宏观表面的接触。所以，实际接触是不连续的(离散的)，小块的。零件表面的接触面积可分为名义接触面积和实际接触面积两种，如图 1.2.3-5 所示。

(1)名义接触面积和实际接触面积。名义接触面积A_n是接触表面的表观面积，由接触表面的外部尺寸所决定，如公式(1.2.3-13)。实际接触面积是表面真实接触的总面积，即图中黑点所示的总面积。

$$A_n = a \times b \tag{1.2.3-13}$$

实际接触面积一般均很小，仅占名义总面积的 0.01～0.1%，其余均为空隙。实际接触面积随载荷的增加而增大。它主要依靠接触点数目的增加和接触点面积的扩大，其中接触点的增加是主要的。微凸体变形所形成的实际接触点的直径为 3～50 μm。

(2)表面实际接触的弹塑性变形。承受载荷的机械零件在相互接触时，接触表面产生弹塑性变形。大多数的实际接触状态是弹性变形与塑性变形的混合状态。由于实际接触发生在表面微凸体的顶端，故该处容易发生塑性变形。弹性变形和塑性变形量的多少，取决于载荷的大小。载荷增加，塑性变形量也随之增加。

接触表面的弹性或塑性变形可以用塑性指数ψ作判据[3]。如果$\psi < 0.6$，则为完全弹性接触。

$$\psi = \frac{E'}{H}\left(\frac{R_s}{r}\right)^{1/2} \tag{1.2.3-14}$$

式中：ψ——塑性指数（无因次）；

E'——综合弹性模量，N/cm²；

H——材料压痕硬度；

R_s——微凸体高度均方根偏差，μm；

r——微凸体平均曲率半径，μm。

$\psi>10$，则为完全塑性接触，当 $0.6<\psi<10$ 时，则为弹塑性混合接触。

（3）赫芝接触[4]。在摩擦学中，许多接触问题涉及到诸如圆柱体、球体等曲面接触，可以应用赫芝理论来计算接触处的应力和应变。

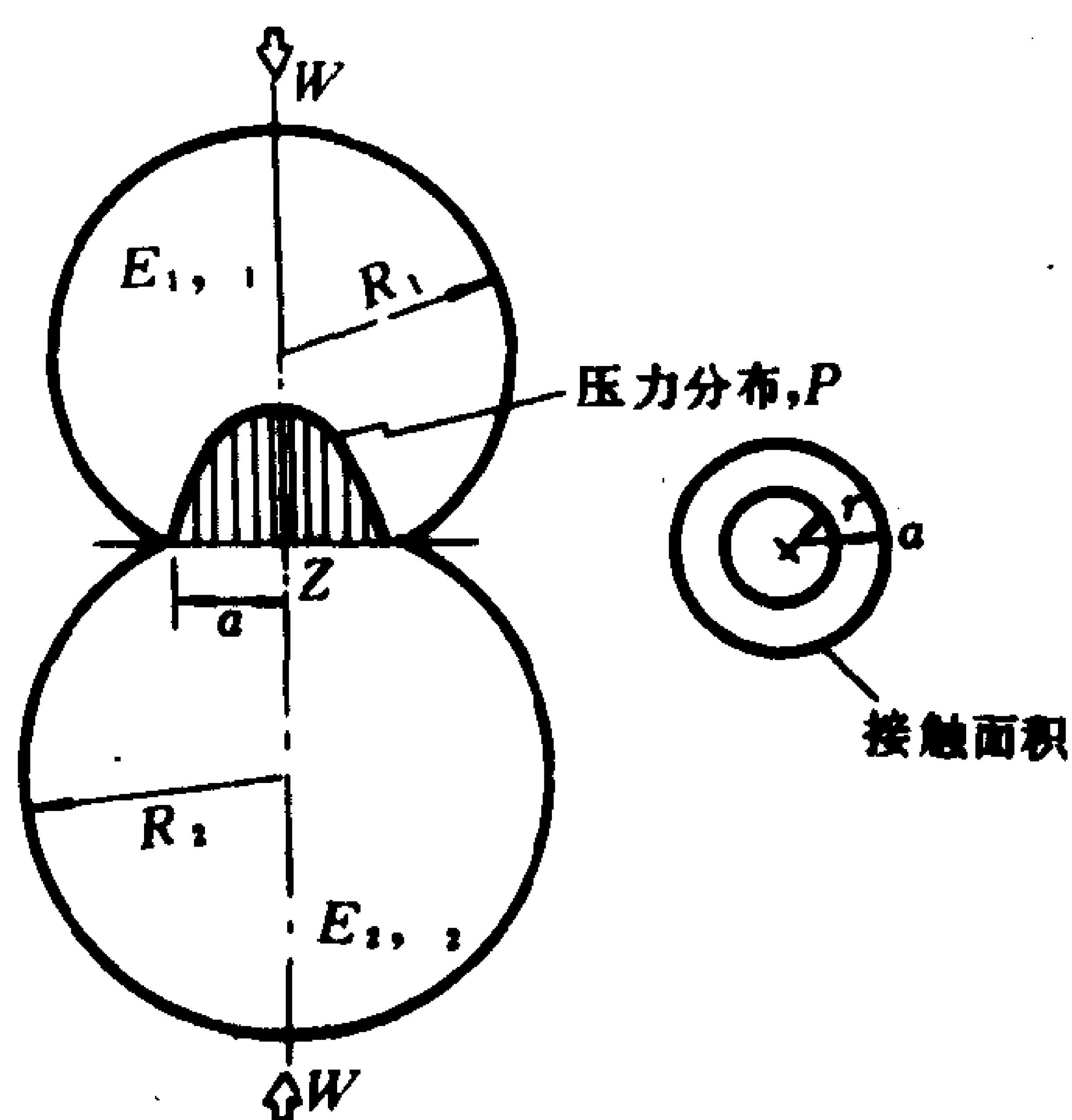


图 1.2.3-6 两球体的赫芝接触

两个球形体的赫芝接触：设两球体的半径分别为 R_1 及 R_2，法向压力为 P，弹性模量分别为 E_1 和 E_2，泊松比为 γ_1 和 γ_2。球面在压力 P 的作用下，接触处呈以 a 为半径的圆，最大压应力 p_{max} 在接触面的中央，最大剪应力 τ_{max} 产生在接触面中央正下方距离为 Z 的位置上，如图 1.2.3-6 所示。

$$a=\sqrt{\frac{3P}{4}\left(\frac{1-r_1^2}{E_1}+\frac{1-r_2^2}{E_2}\right)/\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)} \tag{1.2.3-15}$$

$$p_{max}=\frac{3P}{2\pi a^2} \tag{1.2.3-16}$$

$$\tau_{max}=0.31p_{max}$$

$$Z=0.47a\ (\text{当} r=0.3)$$

两圆柱体沿母线方向接触时：接触处为一矩形，面积为 L（长度）$\times 2a$（宽度）

$$a=2\sqrt{\frac{P}{\pi L}\left(\frac{1-r_1^2}{E_1}+\frac{1-r_2^2}{E_2}\right)/\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)} \tag{1.2.3-17}$$

$$p_{max}=\frac{2P}{\pi La} \tag{1.2.3-18}$$

$$\tau_{max}=0.30p_{max}$$

$$Z=0.786a$$

2.1.4 摩擦系数

摩擦力和法向载荷之比称摩擦系数，用 f 表示：

$$f=\frac{F}{W}$$

摩擦系数是表示材料摩擦特性的主要参数之一。如果摩擦副周围的环境、润滑状态、工作条件等改变时，则摩擦系数也随之改变。例如石墨和石墨摩擦时，在正常大气条件下，摩擦系数为 0.1，但在很干燥的大气条件下，则摩擦系数超过 0.5。由此可见，摩擦系数不是材料固有的特性，而是材料和条件的综合特性。广义说，它是条件（或系统）的函数。

在机械设计中选用摩擦系数时，决不能盲目引用手册上公布的、但没有说明实际条件的摩擦系数，而应结合摩擦副的匹配材料、结构和工作条件等考虑选用。表 1.2.3-1 为几种常用材料的摩擦系数值[5]。

影响摩擦系数的主要因素有：

（1）相同金属或互溶性较大的金属摩擦副，容易发生粘着，故摩擦系数大。不同金属或互溶性差的金属摩擦副摩擦系数小。

表 1.2.3-1 常用材料的摩擦系数

摩擦副材料	摩擦系数f		摩擦副材料	摩擦系数f	
	无润滑	有润滑		无润滑	有润滑
钢—软钢	0.2	0.1~0.2	青铜—青铜	0.15~0.20	0.04~0.10
钢—铸铁	0.16~0.18	0.05~0.15	青铜—钢	0.16	—
钢—青铜	0.15~0.18	0.07	青铜—夹布胶木	0.23	—
钢—轴承合金	0.2	0.04	青铜—硬橡胶	0.36	—
钢—黄铜	0.19	0.03	铝—青铜	0.22	—
钢—铝	0.17	0.02	铝—钢	0.30	0.02
钢—夹布胶木	0.22	—	铝—夹布胶木	0.26	—
软钢—铸铁	0.18	0.05~0.15	硅铝合金—树脂	0.28	—
软钢—青铜	0.18	0.07~0.15	硅铝合金—硬橡胶	0.25	—
铸铁—铸铁	0.15	0.07~0.12	45 淬火钢—聚甲醛	0.46	0.016
铸铁—青铜	0.15~0.21	0.07~0.15	45 淬火钢—尼龙 9	0.57	0.02
铸铁—橡胶	0.8	0.5	(加 3%MoS_2填料)		
铜—铜	0.20	—	45 淬火钢—尼龙 1010	0.039	—
黄铜—硬橡胶	0.25	—	(加 30%玻璃纤维)		
青铜—黄铜	0.16	—			

(2)金属表面存在氧化膜时，摩擦系数小。

(3)表面粗糙度很大或很小时，摩擦系数大。

(4)在干摩擦条件下，滑动速度增加，温度上升，摩擦系数增大。在弹性接触范围内，载荷增加，摩擦系数增大；在塑性接触范围内，载荷增加，摩擦系数缓慢上升。

2.2 机械零件的磨损

磨损就是固体与其它物体或介质相互发生机械作用时，其表面层破坏的过程。如果相互间的作用表现为摩擦力，则为摩擦时的磨损。磨损时，通常以磨粒的形式脱离摩擦表面。分析机械的失效原因，磨损引起的失效占75%。所以，深入研究磨损机理和影响磨损的因素，有针对性地采取相应的措施，是减少失效延长机械使用寿命的重要途径。

2.2.1 零件表面质量对磨损的影响

机械加工后的零件表面都存在着一定程度的粗糙度、残余应力、冷作硬化以及金相组织变化等。这些都影响着机械零件的耐磨性、精度、配合性质、抗腐蚀性、疲劳强度和产品的使用寿命等。

1)机械零件的表面粗糙度

机械零件加工后的表面，即使经过抛光后，在显微镜下观察，表面上仍然存在许多波峰和波谷。表面粗糙度表示表面凹凸不平的程度，是微观几何形状的误差。它主要是加工过程中刀具和零件表面的摩擦、切屑分离时，工件表面的塑性变形，以及工艺系统中高频振动等原因所形成。

表面粗糙度是由宏观粗糙度和微观粗糙度所组成，如图 1.2.3-7 所示。

表面粗糙度不仅对产品的使用性能和使用寿命有很大影响，而且直接关系到产品的可靠

性和制造成本。如在间隙配合中，它影响到工作表面的磨损；在过盈配合中影响到联接强度；在变动载荷中影响到疲劳性能等。因此，对机械零件表面的粗糙度，应有相应的要求，特别对转速高、装配性能与密度性能要求高的产品，更应严格要求。

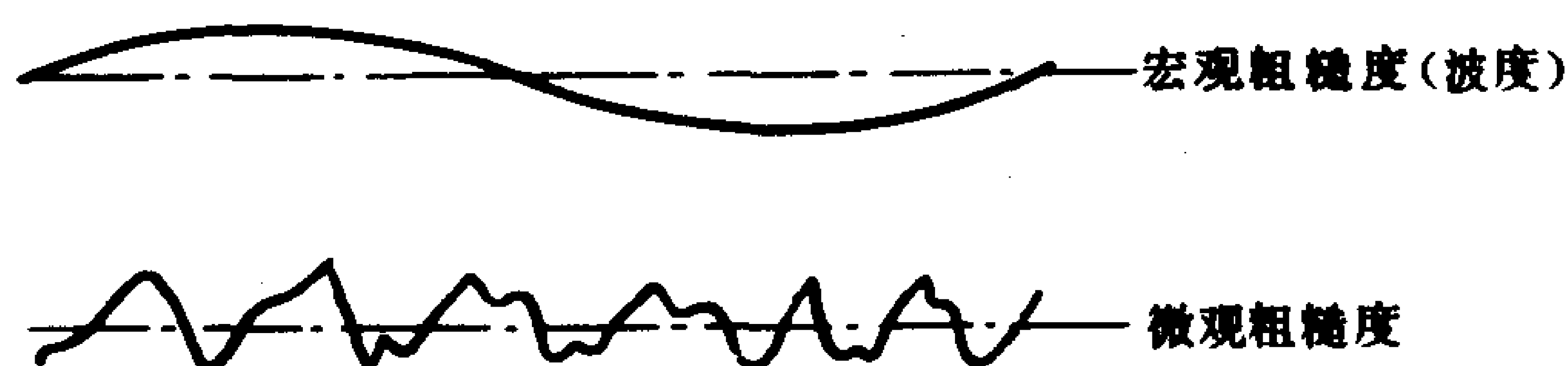


图 1.2.3-7 表面粗糙度

在一般情况下，表面粗糙度值小，零件的工作性能好，使用寿命长。但如零件表面粗糙度很小时，表面非常光滑，不仅加工费用上升，而且在磨合阶段的磨损量反而增加，磨合时间延长，如图 1.2.3-8 所示。因此，在满足使用性能的前提下，应注意选用合适的粗糙度值。

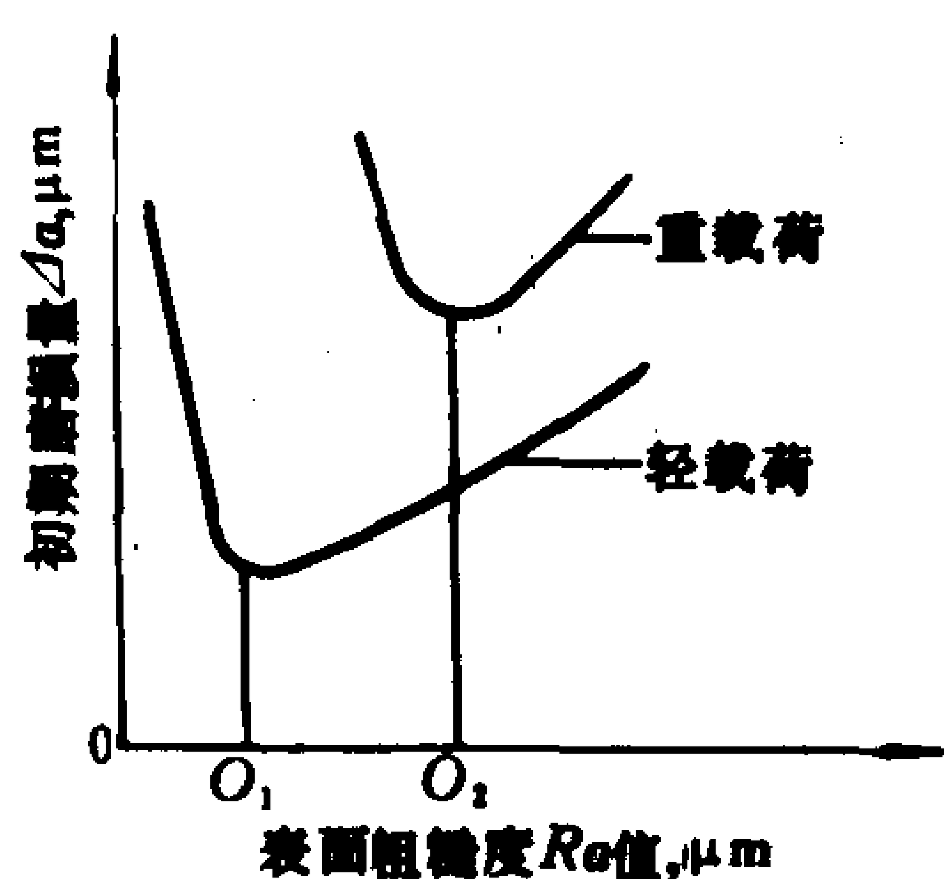


图 1.2.3-8 表面粗糙度与磨损关系

（1）平衡粗糙度值[6]。表示磨合阶段结束后，在稳定的磨损期内，摩擦状态不变时的零件表面粗糙度。它与机械加工后所得的原始粗糙度的大小无关，而是决定于摩擦副的材料、摩擦表面的压力、温度和润滑等。它可以大于或小于原始粗糙度，如图 1.2.3-9 所示。零件表面加工后的原始粗糙度值和平衡粗糙度的值相近时，则磨合过程的时间最少，磨损量也最小。

（2）表面粗糙度选用的一般原则：

①摩擦表面的速度越高和比压越大，则表面粗糙度的值应小，尤其对滚动摩擦应选用较小的粗糙度。

②承受变动载荷的零件表面，以及最易产生应力集中的部位（如圆角处），粗糙度值应小些。

③要求配合稳定可靠时，粗糙度值应选得小些。

④配合零件的表面粗糙度应与尺寸及形状公差相协调。一般说来，尺寸及形状公差要求小时，表面粗糙度值也要小。

⑤一般情况下，同样尺寸公差的轴的粗糙度要比孔的粗糙度值要求高。

2)零件表面层的残余应力

各种工艺过程均可产生残余应力。机械零件在加工过程中，如果表面层温度升高，引起了局部的高温塑性变形，或者发生局部的冷态塑性变形，或是发生了金相组织的变化等，均可产生残余应力。

在热处理或焊接中产生的残余应力，是由于不均匀的温度场引起的热应力或金属相变产生的组织应力。表面喷丸、滚压等表面强化工艺产生残余压应力，能达到强化零件的效果。

残余应力对材料的疲劳强度、静强度、抗腐蚀性能和零部件的尺寸和几何形状精度的稳定性等均有较大影响。残余压应力可以提高疲劳强度和抗腐蚀性能等。残余拉应力则降低材料的静强度，引起零件的早期失效。

对有害的残余应力，可以采取加热法和机械法（振动或锤击等），以及自然时效等措施，使它减小或重新分布。

2.2.2 磨损曲线

机械零件的正常磨损过程一般可分为3个阶段，如图1.2.3-10所示。

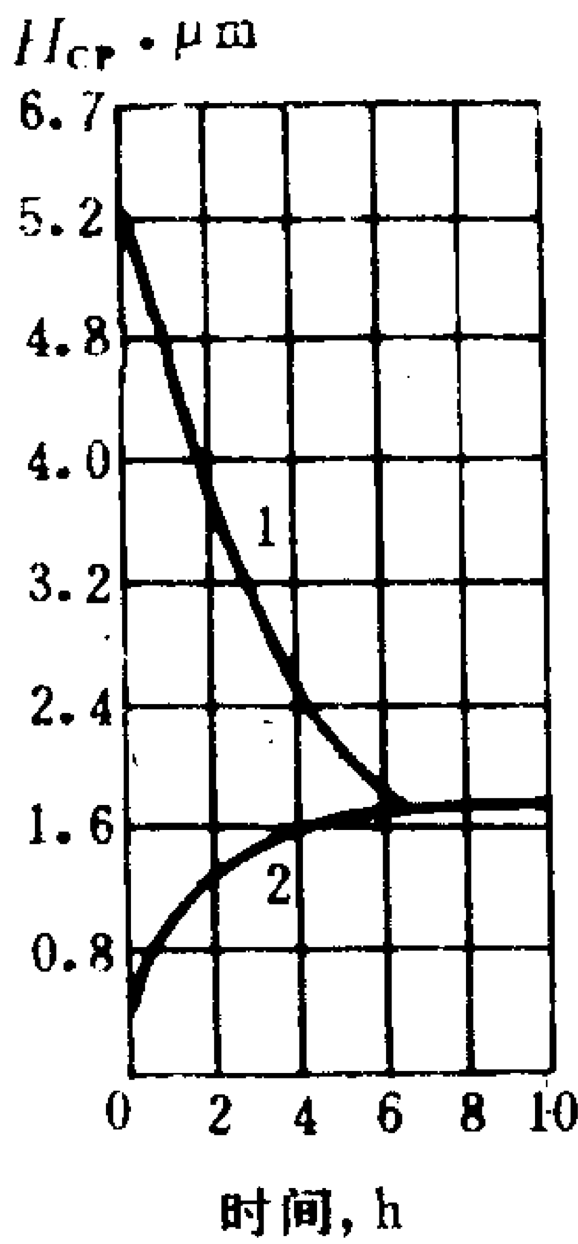


图1.2.3-9 钢轴和青铜轴瓦的平衡粗糙度
1-青铜轴瓦；2-钢轴

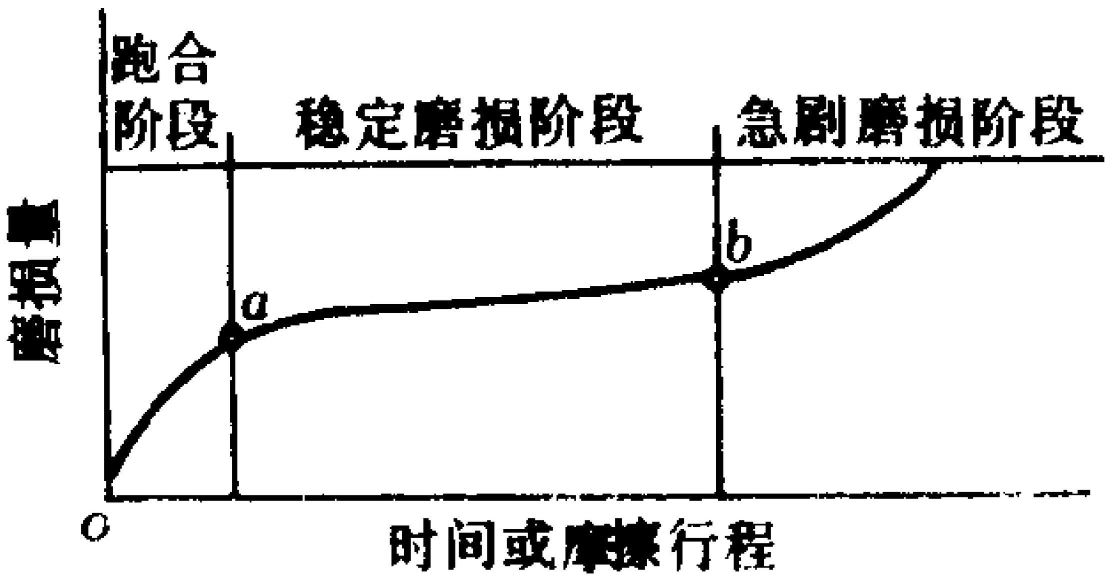


图1.2.3-10 典型磨损曲线

1）跑合阶段 这一阶段的特点是磨损率比较高，摩擦力比较大，摩擦表面温度比较高，容易出现擦伤、咬死等现象。磨合结束后，可使机械加工后的摩擦表面上最高的微凸体被磨平，粗糙度减小，实际接触面积增大，单位面积压力减小，油膜比厚度增加，磨损率下降，机械进入正常状态。为了搞好磨合，必须选择合适的跑合规范，一般是由低到高逐级加速加载，还要保证充分的润滑油量，冷却摩擦表面和带走磨屑。

2）稳定磨损阶段 这阶段的特征是磨损缓慢而稳定，磨损速率基本不变。*ab*线段的斜率就是磨损速率。机械的启动、停车、以及载荷、速度等工作条件的变化，也使零件的磨损率有相应的变化。

3）剧烈磨损阶段 由于零件的磨损，摩擦副配合间隙增大到某一极限值，或是零件表面形状和质量的变化，使磨损率急剧增加。此时的机械效率和精度大大下降，产生异常的振动和噪音，摩擦表面温度升高，导致零件的失效。

2.2.3 机械零件的磨损类型

影响机械零件的磨损因素很多，表面损坏的形式也不一样，按照磨损的机理和特征进行分类，对了解磨损过程和本质，采取正确的抗磨措施有很大实际意义。磨损分类法较多，目前国际和国内较多采用的是英国鲍威尔教授（F. T. Burwell）的分类法[7]。各种磨损类型和表面损坏特征，见表1.2.3-2。

表1.2.3-2 **磨 损 类 型**

类 型	内 容	特 点
粘着磨损	摩擦副相对运动时，接触点粘接或焊接并被剪切，材料由一个表面转移到另一个表面的现象	接触点粘结，剪切和破坏
磨料磨损	在摩擦过程中，硬的颗粒或硬表面上的微凸体，对软表面微切削和犁沟，导至表面破坏	磨料作用于表面破坏
疲劳磨损	当滚动或滚动滑动复合摩擦时，产生交变载荷，使表面产生疲劳破坏剥落	表面层受循环交变应力作用引起金属疲劳
腐蚀磨损	在摩擦过程中，表层金属同时与周围介质发生化学或电化学作用，产生腐蚀和磨损	有化学和电化学腐蚀作用和磨损

机械零件的磨损过程通常不是一种磨损机理起作用，而往往是以一种磨损的形式为主体并伴随着其它磨损形式，单一的磨损机理仅在特殊条件下才能碰到。例如常见的微动磨损，包含着粘着磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。

2.2.4 磨损类型的转化[5]

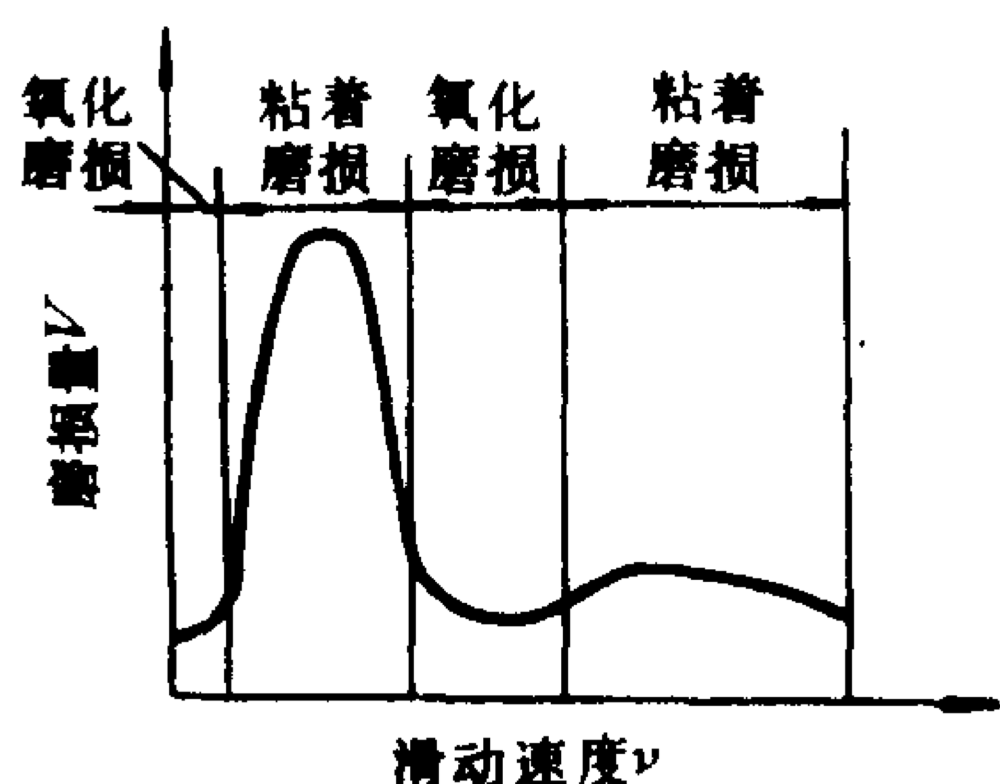


图 1.2.3-11 速度与磨损类型转化关系

随着外界工况条件(载荷、速度、温度等)、介质条件(如润滑剂)、摩擦表面性质的变化等，机械零件的磨损类型可以从一种型式转变到另一种型式。为了提高零件的耐磨性和减少摩擦表面的破坏，或者为了加速磨损过程（如磨合阶段），可以利用和控制磨损类型的转化。如图 1.2.3-11 所示，在干摩擦条件下在销盘式试验机上试验的结果。当载荷恒定不变时，滑动速度很低主要发生氧化磨损，摩擦表面为 Fe_2O_3 所覆盖，故磨损率小。随着滑动速度的增大，氧化膜破坏，磨屑增大，表面变得粗糙，磨损量显著增加，逐渐转化为粘着磨损。滑动速度继续增加，表面温度升高，生成 Fe_3O_4 薄膜，又转化为氧化磨损，磨损率变小，若滑动速度再继续增加，再次转化成粘着磨损。

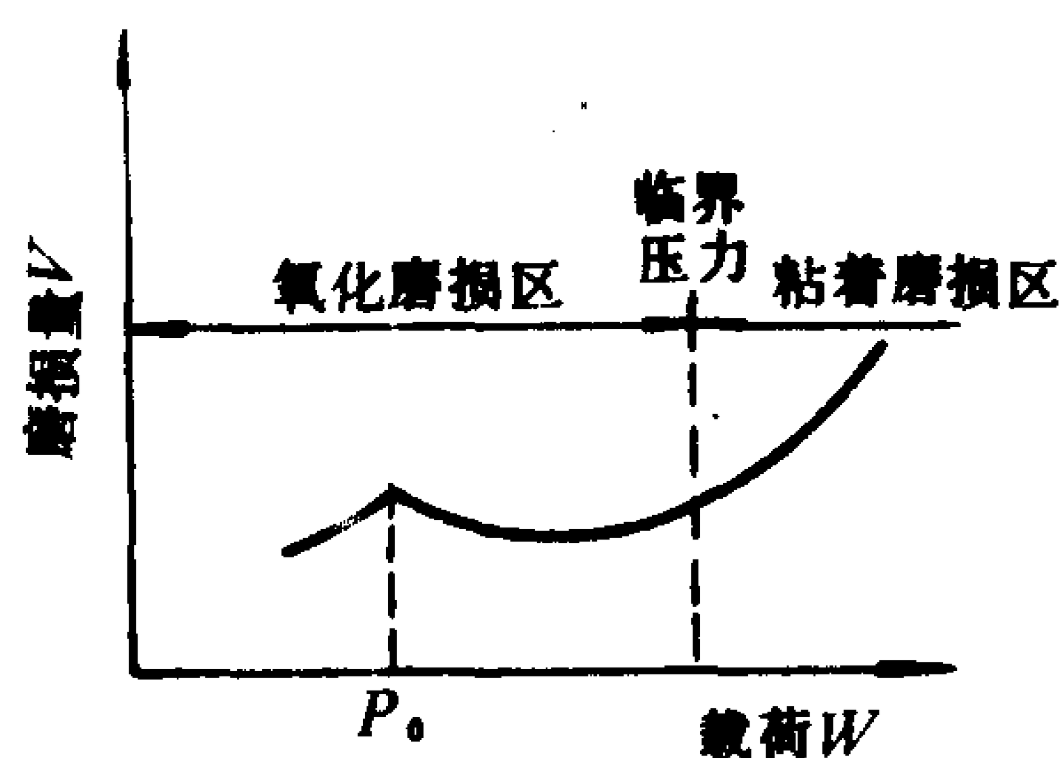


图 1.2.3-12 载荷与磨损类型转化关系

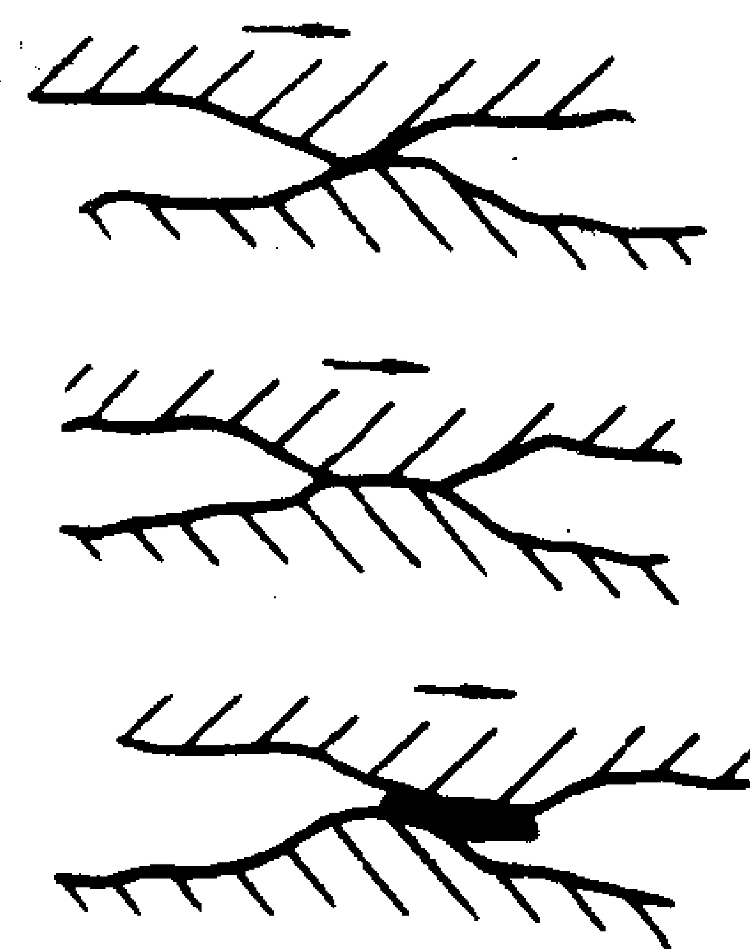

图 1.2.3-13 粘着磨损过程示意图

图 1.2.3-12 表示载荷变化和磨损类型转化的关系。当滑动速度不变，载荷P小于临界压力值时，主要是氧化磨损；大于临界值时，发生粘着磨损。当载荷小于P_0时，表面膜为 Fe_2O_3，大于P_0时，出现 FeO、Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 三种氧化物。

2.2.5 粘着磨损

粘着磨损是由于摩擦物体在法向力和切向力的联合作用下，产生金属与金属的直接接触和塑性变形，从而产生了粘着(连接)、剪切撕脱和再粘着的循环过程。粘着过程的示意图如图 1.2.3-13。

1)粘着磨损的分类

按摩擦表面破坏的程度，粘着磨损可分成 5 类，如表 1.2.3-3。

表 1.2.3-3 **粘着磨损的分类**

类　别	破　坏　现　象	损　坏　原　因
轻微磨损	剪切破坏发生在粘着的结合面上，表面转移的材料少	粘着处的结合强度比摩擦副的两基体金属都弱
涂抹	剪切破坏发生在离粘着处不远的较软金属线层内，软金属涂抹在硬金属表面上	粘着处的结合强度大于较软金属的剪切强度
擦伤	剪切破坏主要发生在软金属的亚表层内，有时硬金属表面也有划痕	粘着处的结合强度大于两基体金属，转移到硬金属表面的粘着物，又拉削软金属表面
撕脱	剪切破坏发生在一方或两方的金属表面深处	剪切应力高于粘着强度，粘着强度大于两基体金属的剪切强度
咬死	摩擦副之间咬死，不能相互运动	粘着强度高于两基体金属剪切强度，粘着区面积大，剪切应力低于粘着强度

2)粘着磨损的简化计算

按照粘着磨损机理，阿查德 (J. F. Archard) 提出了计算粘着磨损的公式[8]。他假设微凸体都是半球形，在法向载荷 W 作用下发生粘着，其半径为 r，当滑动距离为 $2r$时，半球形微凸体被磨去，如图 1.2.3-14 所示。如滑动距离为 L 时，则磨损的体积为：

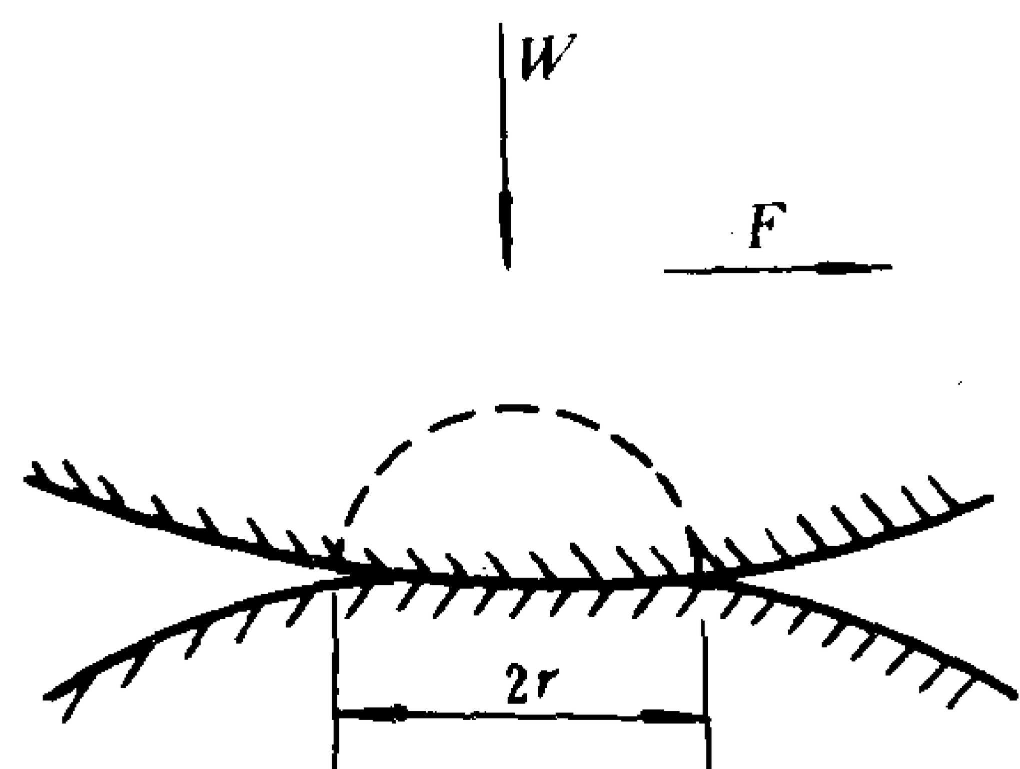


图 1.2.3-14 粘着处脱落的半球形磨屑

$$V=K\frac{WL}{3p_0}=K'\frac{WL}{HB} \qquad (1.2.3\text{-}19)$$

式中：K和K'——粘着磨损系数（与接触的概率和材料等因素有关）；

p_0——较软材料的屈服极限；

HB——较软材料的硬度。

摩擦副不同，摩擦条件不同，粘着磨损系数K值也不同。K 值愈大，磨损也愈大。表 1.2.3-4为不同条件下的部分 K 值（大气中）[5]。

表 1.2.3-4 **不同条件下的 K 值**

摩　擦　副　材　料	摩　擦　条　件	K　值
铜对铜 低碳钢对低碳钢 不锈钢对不锈钢 铜对低碳钢	室温、清洁表面	10^{-2} 10^{-2} 10^{-2} 10^{-3}
所有的金属 所有的金属 所有的金属	清洁表面 润滑不良表面 润滑良好表面	$10^{-3}\sim10^{-4}$ $10^{-4}\sim10^{-5}$ $10^{-5}\sim10^{-6}$
钢 黄铜 各种金属	磨料磨损	10^{-1} 10^{-2} 10^{-2}

从公式(1.2.3-19)。中可知磨损体积与载荷和滑动距离成正比，而与材料的硬度成反比。实验证明，当法向压应力小于材料硬度的三分之一时，磨损率比较小；大于材料硬度的三分之一时，磨损率急剧增加。当存在切向力时，即使法向压应力低于材料硬度的三分之一时，磨损率仍较大。所以，设计时应根据实际情况，许用压应力应低于材料硬度的三分之一。

摩擦副材料对粘着磨损有很大影响。脆性材料比塑性材料抗粘着性能好。相同金属和互溶性大的金属粘着倾向大。采用表面处理工艺可以减少粘着磨损。

2.2.6 磨料磨损

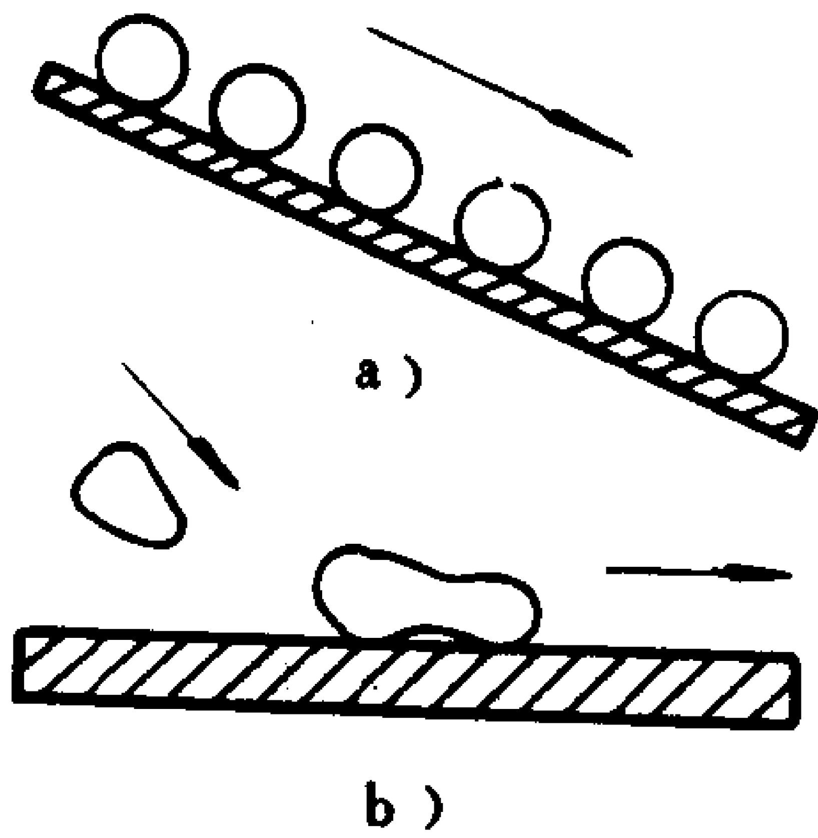
坚硬的磨粒，在两摩擦面间滑动，产生微观切削作用；或是坚硬的粗糙表面，在较软材料表面滑动，将软材料表面犁出沟槽；或者磨粒滚动，引起部分金属多次重复变形等综合作用，使表面材料脱落，产生磨料磨损。

1)磨料磨损的分类

磨料磨损有几种分类方法，按摩擦表面所受的应力和冲击力的大小可分为凿削式磨料磨损、高应力碾碎式磨料磨损和低应力擦伤式磨料磨损三种形式。按摩擦面的数目可分为二体磨料磨损（如凿削式和低应力磨料磨损）和三体磨料磨损（如高应力碾碎式磨料磨损）。它们的分类内容和形式见表 1.2.3-5 和图 1.2.3-15。

表 1.2.3-5　**磨料磨损的分类**

分　　类	产　生　条　件	破　坏　现　象
凿削式磨料磨损	磨料对材料表面产生高应力的碰撞	从材料表面凿削下大颗粒的金属，被磨表面有较深沟槽
高应力碾碎式磨料磨损	磨料与金属表面接触处的压应力大于磨料的压溃强度	脆性材料发生碎裂或剥落，韧性材料产生塑性变形或疲劳
低应力擦伤式磨料磨损	磨料作用于表面的应力不超过磨料的压溃强度	材料表面产生擦伤或微小的切削痕迹



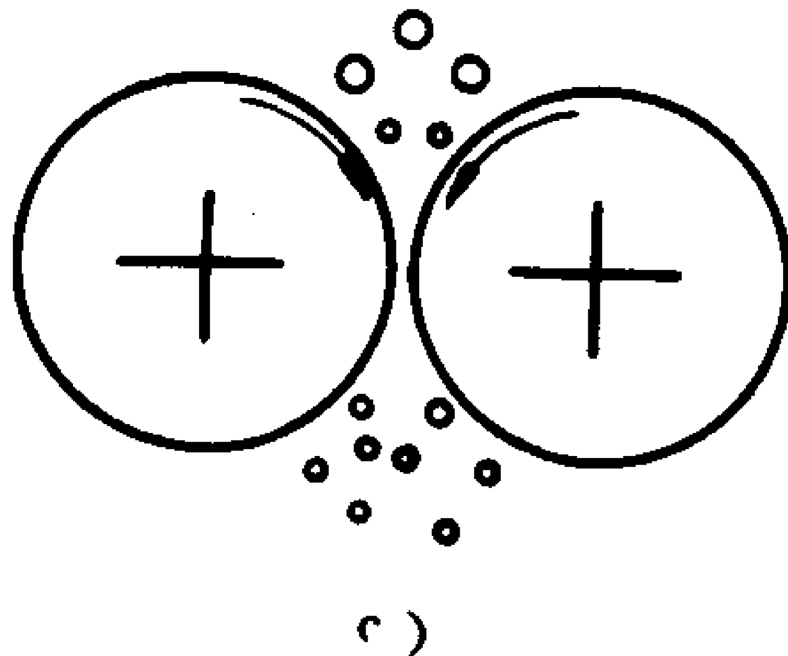


图 1.2.3-15　磨料磨损的类型

a)低应力擦伤式；b)凿削式；c)高应力破碎式

2)磨料磨损的简化计算

根据最简化的二体磨料磨损，以显微切削模型作为计算基础，如图 1.2.3-16 所示。

假设磨粒为理想的圆锥体，滑动距离为 L，法向载荷为 W，则磨损体积为：

$$V=\frac{WL\text{tg}\theta}{\pi p_0}=\frac{KWL}{p_0} \tag{1.2.3-20}$$

式中：K——磨料磨损系数；

p_0——材料的屈服极限。

不同材料，不同磨粒，不同类型的磨料磨损，K 值各不相同。当材料硬度大于磨粒硬度时，K 值显著减小。K 值由试验确定，如对于二体磨料磨损，K 值一般在 $2\times10^{-1}\sim2\times10^{-2}$范围，三体磨料磨损的$K$ 值在 $10^{-2}\sim10^{-3}$范围。

3)影响磨料磨损的主要因素

影响磨料磨损的主要因素是磨粒和摩擦材料。

(1)磨粒的影响。磨粒的形状、大小和硬度直接影响磨料磨损。

①磨粒形状。磨粒形状有利于微切削作用时则磨损严重，如果磨粒形状不利于微切削时

则磨损率低。

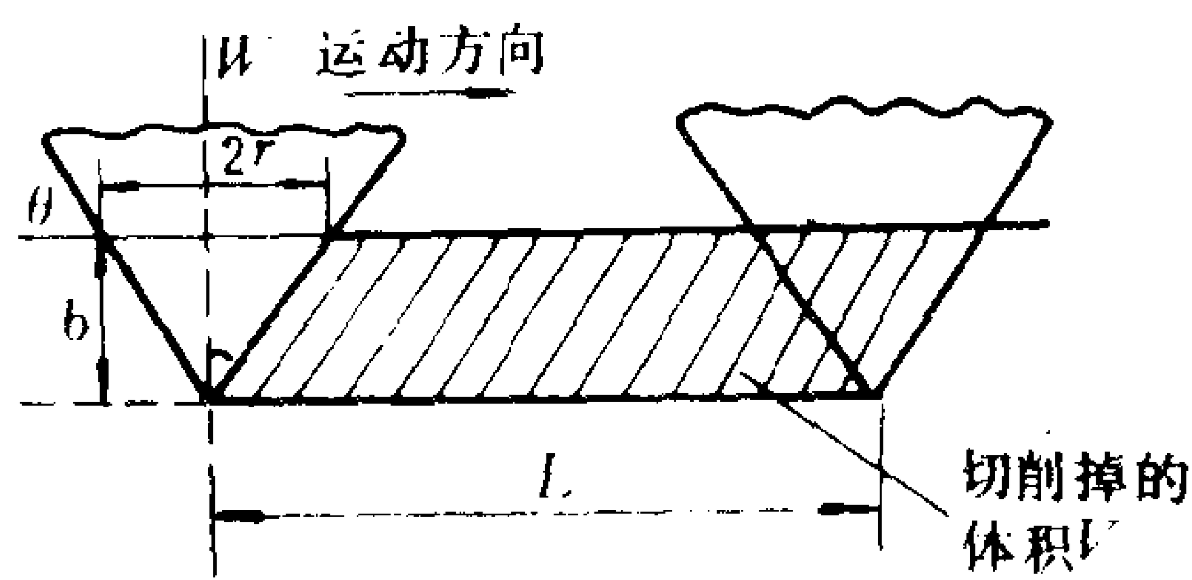


图 1.2.3-16 磨料磨损计算模型

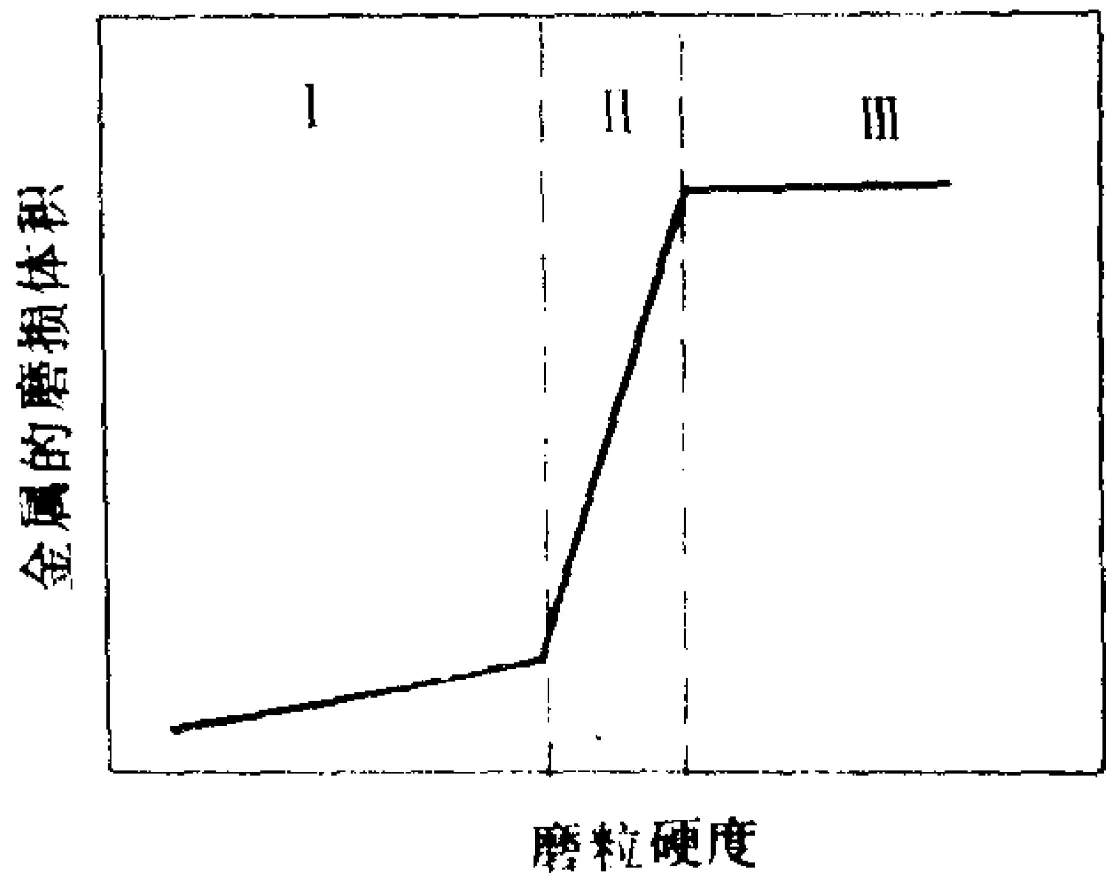


图 1.2.3-17 磨粒硬度与磨损的关系

②磨粒硬度。磨粒硬度 H_a低于材料硬度H_m时，磨料磨损率小。图 1.2.3-17 表示磨粒和材料硬度比对磨料磨损的关系。

Ⅰ 为低磨损区，$H_a < H_m$，Ⅱ为磨损过渡区，$H_a \approx H_m$，Ⅲ为高磨损区，$H_a > H_m$。由此可见，为了降低磨料磨损，材料的硬度应比磨粒硬度高 1.3 倍时效果最好，继续提高材料硬度效果不显著[9]。

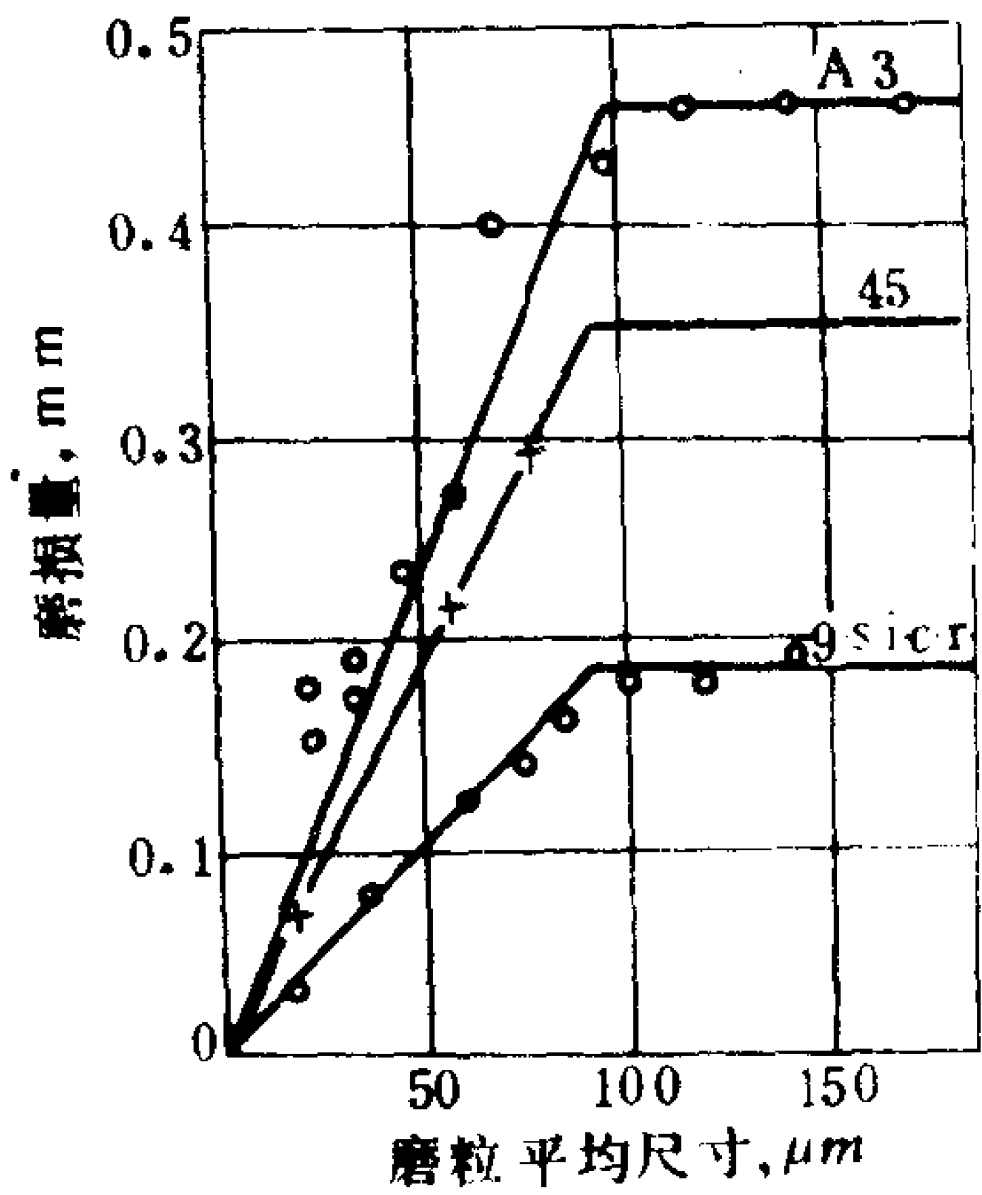


图 1.2.3-18 磨粒尺寸与磨损的影响

③磨粒尺寸。材料的磨料磨损随磨粒尺寸的增大而增加。但当磨粒尺寸达到某一临界值时，磨损量基本保持不变，如图 1.2.3-18 所示。

金属材料性能不同，磨粒的临界尺寸也不同。磨粒的临界尺寸还与工作零件的结构及精度有关。如柴油机油泵柱塞副的磨料磨损，机械杂质的磨粒临界尺寸为 3～6 μm。

（2）材料的影响。金属材料的抗磨料磨损性能和材料的硬度、金相组织和成分等密切相关。在一般情况下，材料的硬度越高，耐磨性越好，抵抗磨粒压入的能力越大。在载荷高，冲击大的情况下，首先要考虑材料的韧性和强度，防止出现裂纹和断裂。因为提高材料硬度，则韧性下降。

材料中的碳含量一定时，铁素体的耐磨性小于珠光体，珠光体小于马氏体，马氏体小于贝氏体。奥氏体和贝氏体具有较高的变形硬化能力和延展性，也有较高的抗磨料磨损能力。

钢中含碳量及碳化物生成元素（如铬、钨、钛、硼等）增加时，则硬度和耐磨性的提高。但含碳量超过一定值时（1%）则脆性增加，耐磨性下降。

2.2.7 疲劳磨损

摩擦表面在交变循环载荷作用下，使材料表面疲劳产生材料脱落称疲劳磨损。

由于疲劳磨损不是一开始就产生，而是经过了一定的循环次数后才出现。所以，疲劳磨损的大小不能用磨损量或磨损率来表示，而是用转数或一定速度下的工作时间来表示其有效

寿命。

1)疲劳磨损的分类

疲劳磨损一般多发生在滚动接触状态或滚动兼滑动状态，如齿轮传动和滚动轴承。

疲劳磨损可分为非扩展性的和扩展性的两类。

（1）非扩展性的疲劳磨损。材料硬度较低，摩擦表面上接触点较少，单位面积上压力较大，载荷循环达到临界次数，接触应力超过材料的疲劳极限时，表面产生小麻点。随着接触面积的扩大，单位面积的压力降低，小麻点停止扩展。对于塑性较好的材料，表面因加工硬化提高了强度，使小麻点不能继续扩大。

（2）扩展性的疲劳磨损。材料的硬度较高，塑性较差，当作用在两接触面上的交变应力过大，或润滑不良时，在跑合阶段就产生小麻点。这些小麻点不断增加和扩大并相连成痘斑状凹坑或大面积剥落，严重时导致零件失效。

2)影响疲劳磨损的主要因素

疲劳磨损和疲劳裂纹的形成及扩展密切相关。因此凡是能够阻止或延缓裂纹形成和扩展的因素都可以减少疲劳磨损。影响接触疲劳的主要因素有下列几个方面。

（1）材料因素。金属材料中非金属夹杂物等冶金缺陷，在交变应力作用下，是疲劳微裂纹萌生的重要根源。所以，提高冶金质量即可减少疲劳磨损。

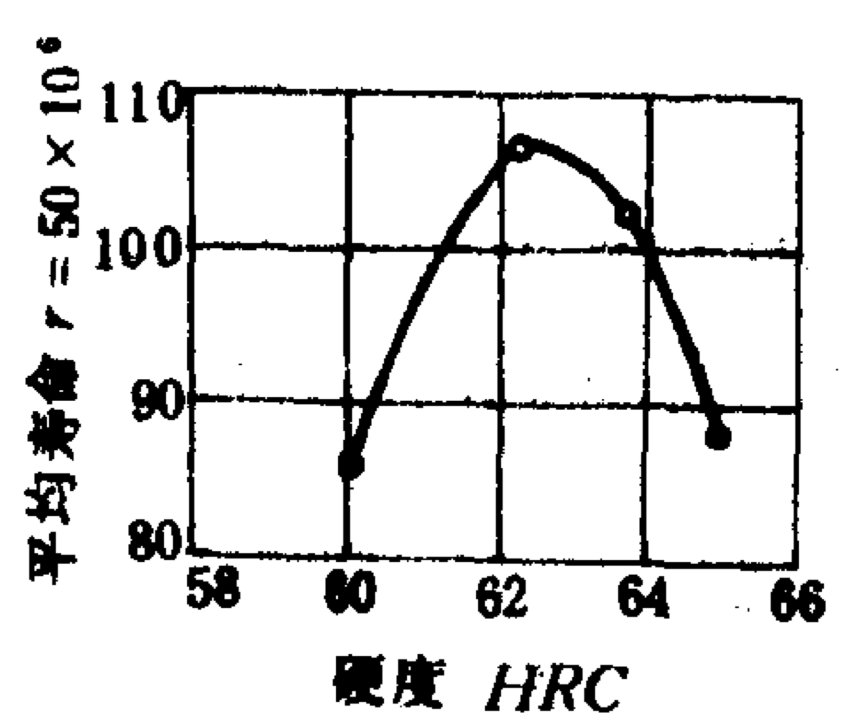


图 1.2.3-19 硬度与疲劳磨损关系

钢中固溶体的含碳量控制在 0.53%最好。含碳量过多，脆性增加，疲劳寿命降低。含碳量过小，则降低钢的基体强度与硬度，削弱了基体抗疲劳磨损的能力。

在一定硬度范围内，抗疲劳磨损的能力随硬度的升高而增大，继续增加硬度则下降。例如轴承钢的表面硬度为HRC 62时，抗磨损的能力最好，如图 1.2.3-19 所示。

摩擦副硬度的匹配是否正确也很重要。例如齿轮摩擦副的选配。对硬齿面来说可不考虑硬度差，而对软齿面则一般要求小齿轮的硬度大于大齿轮。

（2）表面粗糙度。减小表面粗糙度，可以有效地增强抗疲劳磨损的能力，但过高地减小表面粗糙度，不仅成本增加，而且效果也不大，例如表 1.2.3-6 所示滚动轴承的情况。

表 1.2.3-6 滚动轴承表面粗糙度和使用寿命关系

原有粗糙度 μm	提高的粗糙度 μm	寿命延长倍数
0.8	0.4	2~3
0.4	0.2	1
0.2	0.1	0.4

（3）表面残余应力。表面残余压应力有效地提高抗疲劳磨损能力，残余拉应力则降低抗疲劳磨损能力。

（4）润滑油影响。润滑油粘度大，表面接触部分的压力愈接近平均分布，相对地降低了最大接触压应力，提高抗疲劳磨损能力。润滑油粘度低时，容易渗入裂纹，加速裂纹扩展。

润滑油中含水量多时可促使发生点蚀，故应严格控制含水量。润滑油中加入某些添加剂（如 MoS_2）可减少疲劳磨损。

2.2.8 腐蚀磨损（或称机械腐蚀磨损）

在磨损过程中，材料同时与周围介质发生化学或电化学相互作用的磨损称腐蚀磨损。所以，零件发生腐蚀磨损时，摩擦表面的破坏是由于同时遭受了腐蚀和机械磨损的结果。

由于摩擦副周围介质的性质不同，摩擦副材料不相同，腐蚀磨损的状态也各异。腐蚀磨损一般可分为 3 类：氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损和气蚀。

1)氧化磨损

氧化磨损是最常见的一种磨损形式。除金、铂等少数金属外，大多数金属表面都与空气中的氧起化学反应生成氧化膜，覆盖在金属表面上。氧化膜不断被磨掉又不断地产生。在摩擦状态下，氧化膜形成的速度比静态要快得多。氧化膜能隔离金属表面的直接接触，减少粘着。

(1)氧化膜的性质。脆性氧化膜与基体金属结合差，容易被磨掉。韧性氧化膜则相反。例如铝的氧化膜硬而脆，容易破碎磨去。在适当条件下，钢的氧化膜较坚韧，对摩擦表面有保护作用。

(2)氧化膜与基体金属硬度关系[10]。腹化膜的硬度为 H_o，基体金属硬度为 H_m，当 $H_o > H_m$ 时，即使载荷小，氧化膜也易破坏。如 $H_o \approx H_m$，小载荷下不易破损，大载荷下仍易磨损。H_o 和 H_m 都很大时，在载荷作用下变形量小，氧化膜不易破损。

2)特殊介质腐蚀磨损

除氧以外的其它盐、碱、酸等特殊介质和摩擦表面发生的化学腐蚀作用而形成的磨损。其磨损机理和氧化磨损相似，但磨损速度较快。介质的腐蚀性越强，温度愈高，则腐蚀磨损的速度也愈大。

金属中某些合金元素如镍、铬、钛等在特殊介质中形成结构致密、结合力强的钝化膜，减少腐蚀磨损。钨和钼在 500℃ 以上时，表面产生保护膜，所以是抗高温腐蚀的重要合金元素。因此，选择合适材料是减少腐蚀磨损的重要途径。

3)气蚀

零件与液体相接触并作相对运动时产生的表面破坏称气蚀，如螺旋桨叶片表面的气蚀。气蚀的特征是表面局部地区出现麻点、针孔，严重时呈聚集的蜂窝状孔穴群。

当液体与零件接触处的局部压力低于液体的蒸发压力时，或者零件的表面振动使液体内部发生压强变化时，都可形成气泡；同时溶在液体中的气体也可以析出形成气泡。这些气泡随液体流到大于气泡内压的高压区时，则气泡被压缩破灭。在气泡破灭时的瞬间，将产生很大的冲击压力和高温，反复作用在零件局部很小的表面区域，使材料产生塑性变形，导致疲劳破坏脱落呈麻点状，随后扩展呈泡沫海绵状。气蚀是一种比较复杂的破坏现象，它往往不是机械作用所造成的破坏，液体的化学及电化学作用，液体中含有磨料等都可加剧这一破坏过程。

改进零件的结构形状(如流线型)，使其不产生或少产生涡流和局部地区流速过快的现象；提高零件刚度，减少振动，或在液体中加入某些添加剂，改进液体性质等，都可减少气蚀破坏。采用抗腐蚀的不锈钢、高强度硬金属、非金属材料等都可提高抗气蚀的能力。

2.2.9 微动磨损

微动磨损是一种较典型的复合式磨损，可以包含着粘着磨损、磨料磨损、腐蚀磨损和疲

劳磨损。微动磨损是在两个相对静止的零件的接触表面间，受外界影响(振动或一个零件的循环应力作用)，在该处产生低振幅的相对滑动，振幅一般为2～20 μm，引起的磨损现象。如果在微动磨损过程中，以化学反应的腐蚀磨损作用为主时，则称微动腐蚀磨损。

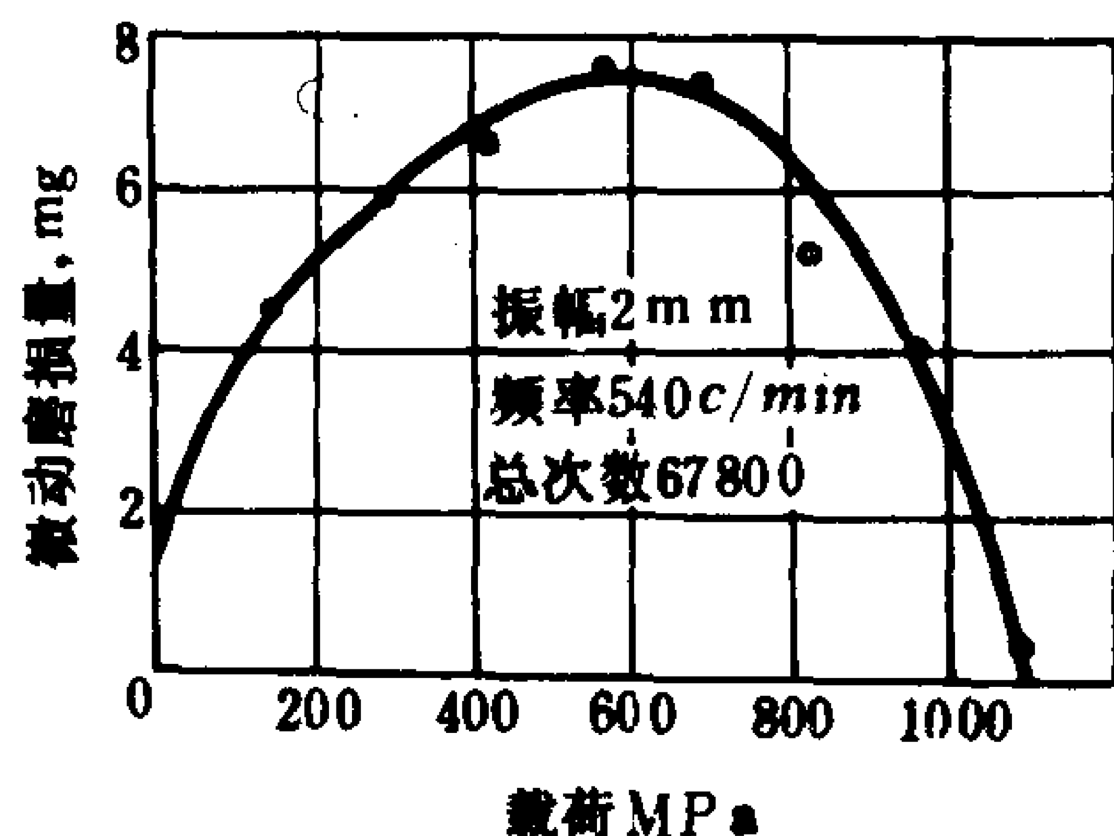


图 1.2.3-20 微动磨损与载荷的关系

微动磨损的主要特征是摩擦表面间出现大量的氧化物磨屑，例如钢铁零件的磨屑为红色的Fe_2O_3。微动磨损通常发生在过盈配合的轮和轴、螺栓连接、钢丝绳等部件。

1)微动磨损的机理

两个联接的零件在压力作用下，接触表面的微凸体发生粘着，外界小振幅引起的振动，使粘着点被剪切和脱落成磨屑。由于循环应力作用，表面或亚表面萌生裂纹，发生疲劳损伤或脱层损伤的金属磨屑。在和空气接触时被氧化成氧化物。由于两表面被压紧，磨屑不易排出，故形成磨料，但可使表面隔开，减轻磨损。

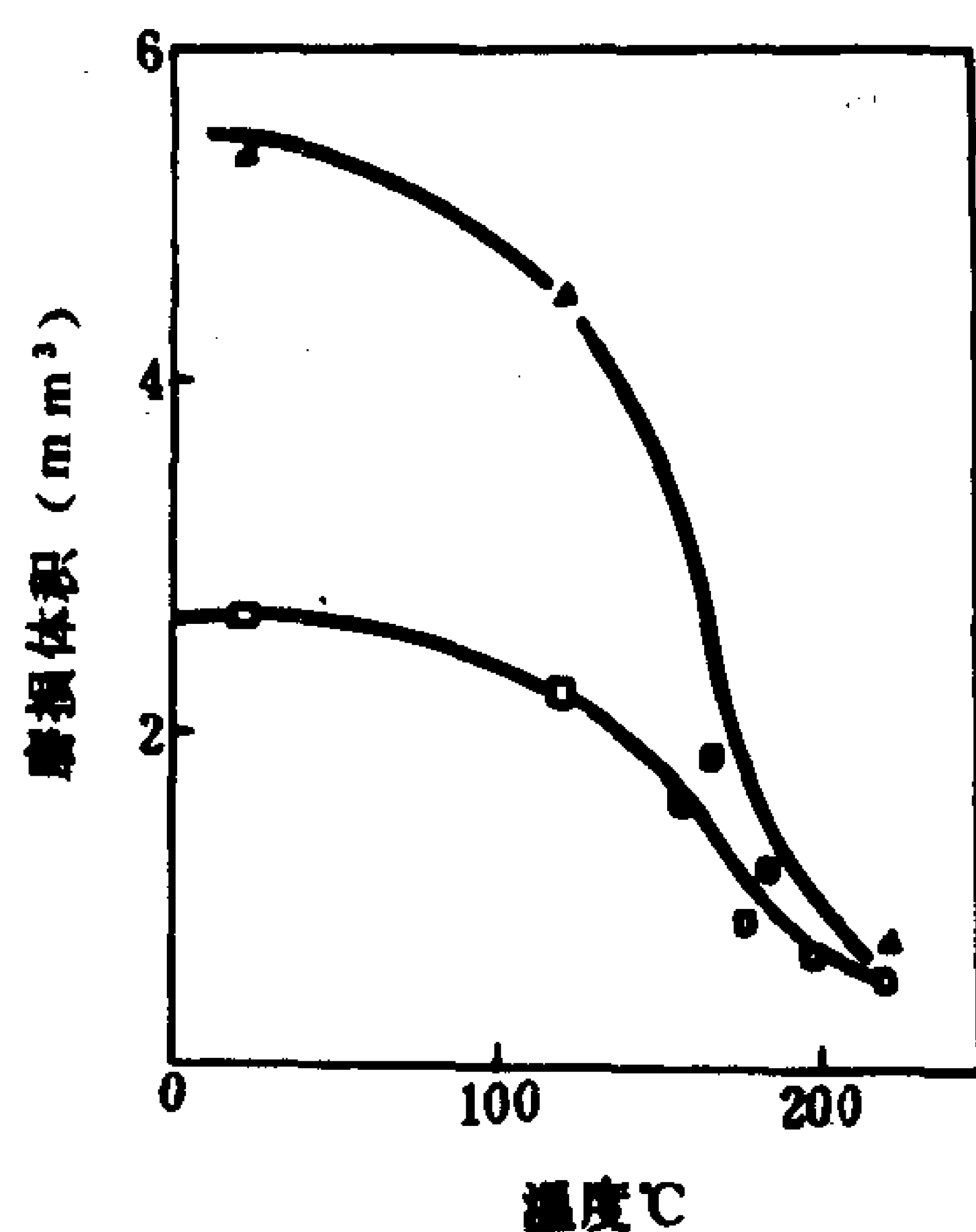


图 1.2.3-21 微动磨损和温度的关系

2)减少微动磨损的措施

微动磨损的危害甚大，不仅能使紧配合的部件松弛，更严重的能使疲劳强度降低70～80%，出现疲劳裂纹，导致疲劳断裂。减少微动磨损的措施主要有下列几种：

(1)减小振幅。一般认为在给定的循环次数条件下，振幅小于70 μm时，磨损率较低。

(2)载荷的影响。试验证明，在一定条件下，磨损量随载荷的增加而上升，但超过某一临界值时则不断下降，如图1.2.3-20所示，故有时可采取加大压力的措施，如加大过盈配合的过盈量来降低微动磨损。

(3)提高温度。材料不同，温度的影响也有一定差异。一般来讲，温度升高，表面氧化物增厚，磨损量下降，如图1.2.3-21所示。莱特(K. H. R. Wright)的试验，认为中碳钢的微动磨损量在临界温度130℃时发生转折，超过此临界温度后，微动磨损量下降迅速。

表 1.2.3-7 不同摩擦副抗微动磨损的能力（空气中、干摩擦）

良　　好	中　　等	不　　好
冷轧钢与冷轧钢	钢与钢合金	铝与不锈钢
淬火工具钢与工具钢	铸铁与铸铁	铝与铸铁
铸铁与磷化铸铁	铸铁与铜	铸铁对镀铬层
铸铁与铸铁 MoS_2 润滑	铸铁与锌	镀铬层对镀铬层
铸铁与不锈钢 MoS_2 润滑	钢与锌	铝与铝
磷覆盖层的钢与钢	钢与钢合金	镍与钢

（4）采用润滑。微动磨损处一般都是紧固连接，故润滑困难。如接触表面能被润滑，则润滑剂可防止氧与金属接触，减少氧化。粘度高的润滑油比粘度低的润滑油抗磨损效果好。

（5）选用合适材料。应选用硬度较大，断裂韧性较好，抗粘着和疲劳强的材料。表1.2.3-7为几种摩擦副材料抗微动磨损优劣的情况。

2.3 机件的断裂

材料的断裂是当外力增大到超过材料临界抗力时，使材料沿某一原子面分开的过程。为了预防机件在使用过程中不发生断裂事故，常规的设计方法是规定机件的使用应力值不超过许用应力值，延伸率和冲击值不低于规定值。这样虽然保证了绝大多数机件的安全使用，但有时虽在安全设计范围内，使用应力比许用应力低得多的情况下，仍然会发生断裂事故。这种断裂事故一般称低应力脆断（脆性断裂）。

运用材料力学难以对脆性断裂作出正确解释。材料力学假设材料是各向同性的均匀的连续介质。但实际上材料中往往存在缺陷，如夹杂、气孔、裂纹等。所以，材料并非连续均质和各向同性。机件在使用过程中也可产生疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹等。机件发生断裂事故的主要原因，是材料中存在缺陷（特别是裂纹）和材料对缺陷的敏感性。

脆性材料对缺陷很敏感，裂纹扩展时尖端不产生塑性区，断裂的发生是突然的，没有明显的塑性变形，危险性最大。韧性材料对缺陷不敏感，裂纹扩展时前端产生塑性区，断裂时一般有明显的宏观塑性变形。

绝大多数材料对缺陷的敏感性随温度而变，温度下降，敏感性增强。在常温时有一定韧性的材料，在低温时可变成脆性材料。材料的韧性和脆性是相对的，有条件的。例如在三向拉应力状态下，韧性材料也可发生脆性断裂；在三向压应力状态下，脆性材料可以发生明显的塑性变形。

脆性断裂可以应用线弹性断裂力学进行研究分析。如果裂纹尖端塑性区域较大，则用弹塑性断裂力学进行分析。

2.3.1 线弹性断裂力学

对于发生脆性断裂的机件，裂纹前端产生小的塑性区，如其尺寸相对于裂纹的尺寸很小，裂纹周围仍是均匀连续的弹性介质，弹性力学的方法仍适用，可以用线弹性理论进行分析，称为线弹性断裂力学。

应用线弹性断裂力学对含裂纹的机件进行力学分析，一般可以从两个方面进行。一是对裂纹尖端附近应力应变场强度进行分析，即应力强度因子法，二是从裂纹体应变能的释放率进行分析，即能量释放率法。

2.3.2 格里菲斯 (A. A. Griffith) 理论及其能量判据

格里菲斯理论是线弹性断裂力学的基础。他在本世纪 20 年代采用能量平衡法研究了玻璃、陶瓷等脆性材料的断裂现象。认为当玻璃中存在裂纹时，就会形成一个新的自由表面，需要一定的表面能，它由材料中所释放的弹性应变能提供。当裂纹扩展时，裂纹表面的表面能将进一步增长，贮存在材料中的弹性应变能则随之减少。如果裂纹周围材料所释放的弹性应变能等于或超过使裂纹扩展所需的能量时，则毋需增加载荷，裂纹就会发生扩展。

格里菲斯假设一块等厚度的无限大平板，施加外力使板内产生均匀的拉应力σ后，将两端固定以隔绝外部的能源，设想在板上存在一个垂直于拉应力σ方向并且贯穿板厚的裂纹，其长度为 $2a$，如图 1.2.3-22 所示。根据格里菲斯理论，可以计算出平面应力和平面应变时的临界

应力值σ_c和临界裂纹长度a_c的值，即：

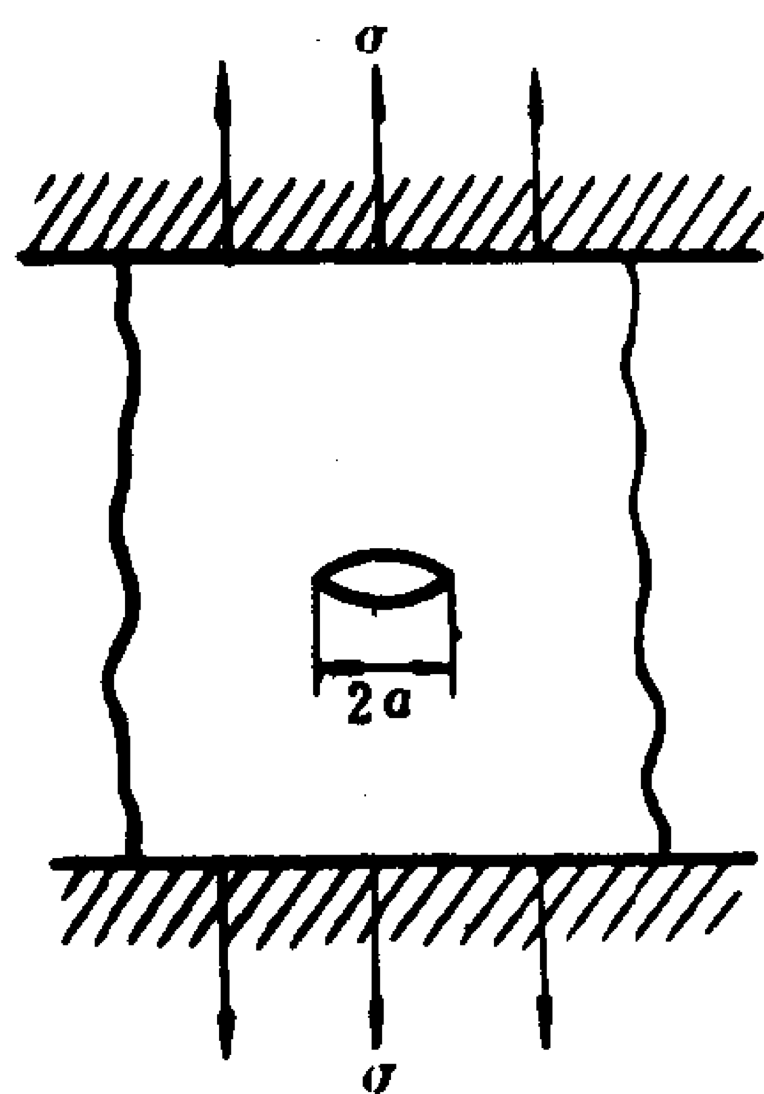


图 1.2.3-22

无限大板中的穿透裂纹

$$\text{平面应力}\quad \left.\begin{aligned}\sigma_c&=\sqrt{\frac{2ET}{\pi a}}\\ a_c&=\frac{2ET}{\pi\sigma^2}\end{aligned}\right\}\tag{1.2.3-21}$$

$$\text{平面应变}\quad \left.\begin{aligned}\sigma_c&=\sqrt{\frac{2ET}{\pi\ (1-\nu^2)\ a}}\\ a_c&=\frac{2ET}{\pi\ (1-\nu^2)\ \sigma}\end{aligned}\right\}\tag{1.2.3-22}$$

式中：E——材料的弹性模量；

T——表面张力；

ν——材料的泊桑比。

上述为格里菲斯公式，也称格里菲斯脆性断裂能量判据[11]。当外力达到σ_c值时，或裂纹长度达到a_c值时，裂纹系统处于不稳定状态，裂纹将产生失稳扩展导致脆性断裂。

2.3.3 阿罗旺 E. Orowan 修正理论

阿罗旺修正理论是对格里菲斯理论的修正[12]。格里菲斯将裂纹失稳扩展时释放出的弹性应变能完全转变成裂纹扩展的新表面的表面能。这一理论对于理想的脆性材料是适用的，但用来解决金属材料的断裂并不完全成功。因为对于金属材料在裂纹尖端附近总会出现塑性变形。有塑性变形时，裂纹扩展时所释放出的弹性变形能除一部分转变为表面能外，还有一部分转变为塑性变形能。阿罗旺令裂纹扩展每单位表面积所需要的总能量为$(T+u_p)$，故格里菲斯公式应改为：

$$\text{平面应力}\quad \left.\begin{aligned}\sigma_c&=\sqrt{\frac{2E\ (T+u_p)}{\pi a}}\\ a_c&=\frac{2E\ (T+u_p)}{\pi\sigma^2}\end{aligned}\right\}\tag{1.2.3-23}$$

$$\text{平面应变}\quad \left.\begin{aligned}\sigma_c&=\sqrt{\frac{2E\ (T+u_p)}{\pi\ (1-\nu^2)\ a}}\\ a_c&=\frac{2E\ (T+u_p)}{\pi\ (1-\nu^2)\ \sigma^2}\end{aligned}\right\}\tag{1.2.3-24}$$

2.3.4 裂纹扩展模型

在外载荷作用下，固体中的裂纹受应力作用，裂纹的扩展型式有三种，如图 1.2.3-23 所示。

第Ⅰ型称张开型，由垂直裂纹的拉应力造成，裂纹尖端张开，裂纹沿x轴方向扩展。

第Ⅱ型称滑开型，在剪切应力作用下，裂纹上下两面平行滑开。

第Ⅲ型称为撕开型，在z轴方向剪应力作用下，裂纹面上下错开，此时裂纹沿x轴方向扩展。

如果裂纹同时受正应力和剪切应力作用，即同时存在Ⅰ型和Ⅱ型或Ⅰ型和Ⅲ型的受力状态时，称为复合型裂纹。Ⅰ型裂纹是工程中最常见的和最危险的裂纹扩展类型，故一般多讨论Ⅰ型裂纹。

2.3.5 应力强度因子K

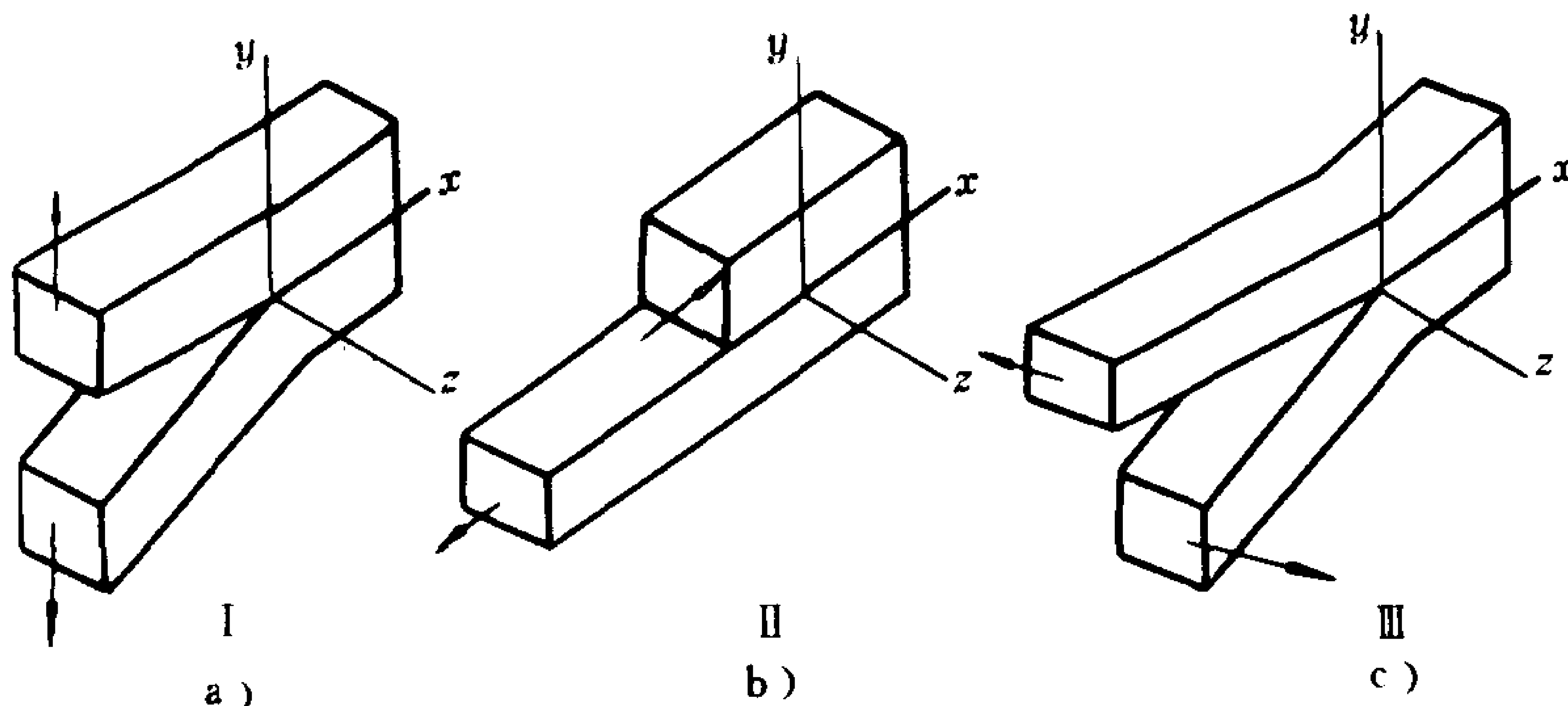


图 1.2.3-23 裂纹扩展的三种模型

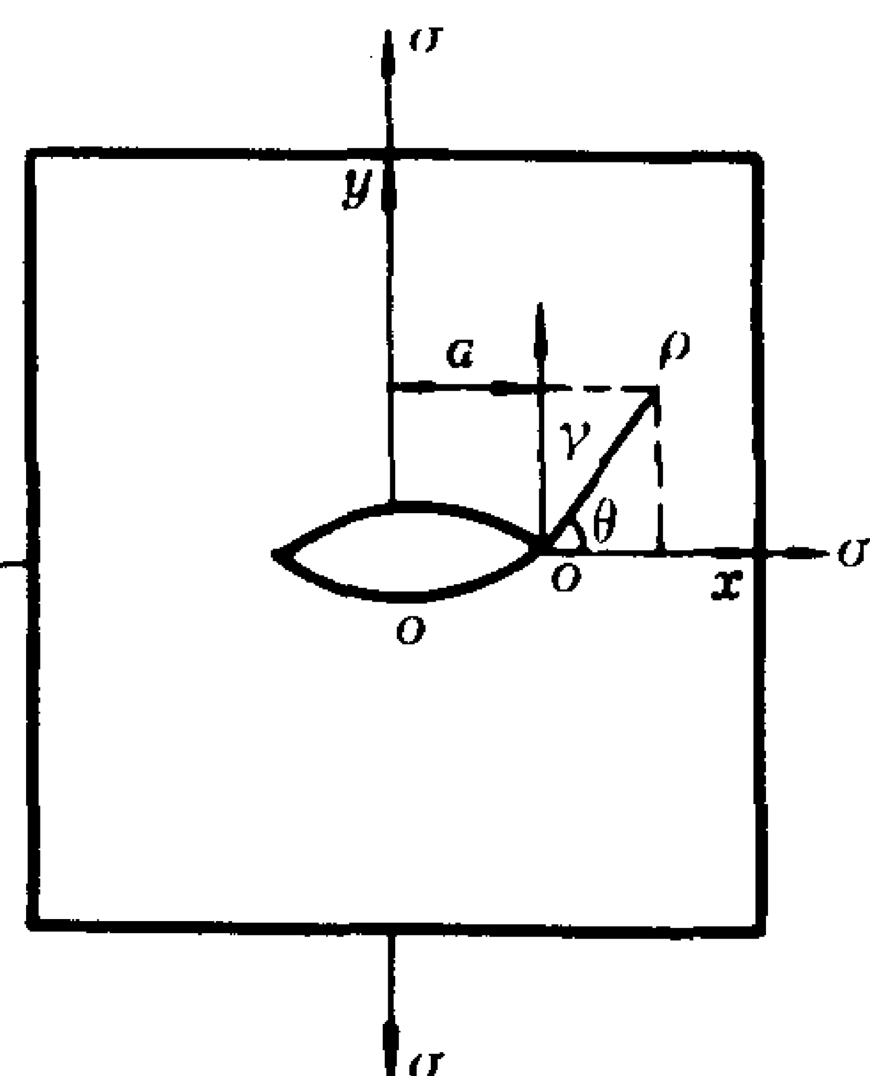


图 1.2.3-24 双向应力作用下的张开型裂纹

1)裂纹尖端应力场分析 图 1.2.3-24 为一无限宽板内有一条长 $2a$的贯穿板厚的裂纹，板边受拉应力σ作用使裂纹张开。如果板很厚，属平面应变问题；板很薄，则是平面应力问题。根据线弹性理论，可求得裂纹尖端附近各点的应力分量和应变分量。

对裂纹尖端前任意一点P（r、θ）的应力分量如下[13]：

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\sigma_z &= \begin{cases} o & \text{（平面应力）}\\ \nu(\sigma_x+\sigma_y) & \text{（平面应变）}\end{cases}\\
\tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}
\end{aligned}\right\} \tag{1.2.3-25}$$

式中：θ与r——P点板坐标的板角和板轴；

ν——泊桑比。

上式是$r \ll a$的范围内裂纹尖端附近应力场的近似表达式，愈接近裂纹尖端，精确度愈高。

2)应力场强度因子K。公式 1.2.3-25 中的各应力分量均有一共同因子K_I，它决定裂纹尖端附近应力和应变场的大小。这个共同因子K_I称为应力强度因子K。

应力强度因子是在外力作用下含裂纹体处于弹性平衡状态时，裂纹尖端附近的弹性应力，应变场强弱程度的度量，用K表示。如下角标 I，表示为 I 型裂纹的应力强度因子K_I。

在图 1.2.3-24 的情况下；

$$K_I=\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1.2.3-26}$$

σ反映外载荷的影响，$\sqrt{a}$表示裂纹尺寸的影响。在一般情况下，I 型裂纹的应力强度因子可

以用下式表示：

$$K=C\sigma\sqrt{a} \tag{1.2.3-27}$$

式中，C为无因次数，它与机件的形状尺寸、裂纹形状部位以及加载方式等有关。例如对于无限大板中贯穿的裂纹，$C=\sqrt{\pi}$。

K_I的单位是$MPa\cdot m^{1/2}$或$MN\cdot m^{-\frac{3}{2}}$。

3)断裂韧性　断裂韧性表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的度量，是材料抵抗低应力脆性破坏的韧性参数。对每一种特定工艺状态下的材料，其断裂韧性是个常数，它与材料的成分和热处理工艺有关，而与材料中裂纹大小，几何形状及加载方式无关。所以，它是材料的一种性能。材料的断裂韧性值愈高，机件阻止裂纹失稳扩展的能力也愈大。当机件裂纹处的应力场强度因子K_I小于材料的断裂韧性K_{IC}时，机件是安全的，反之则不安全。

2.3.6　能量释放率G

机件在外力作用下发生变形，同时也引起结构内部的能量变化。这种能量变化遵守一定规律。应用能量方法可以对裂纹扩展力进行分析和计算。带裂纹的机件，如裂纹在扩展中没有外力继续补充能量，则带裂纹体所释放的应变能G，满足裂纹扩展所需的能量时，推动裂纹扩展。在格里菲斯裂纹体中：

$$\left.\begin{aligned}&\text{平面应力}\quad G_I=\frac{\pi a\sigma^2}{E}\\&\text{平面应变}\quad G_I=\left(\frac{1-\nu^2}{E}\right)\pi a\sigma^2\end{aligned}\right\} \tag{1.2.3-28}$$

通常将裂纹扩展单位面积时系统所释放的应变能G称能量释放率。

在临界状态时，裂纹扩展的能量释放率以G_{IC}表示。G_{IC}值愈大，裂纹扩展的能量也越大，故G_{IC}是材料抵抗裂纹扩展能力的度量，因此也称为断裂韧性。

在国际单位制中，G_I的单位是J/m^2(J是功的单位焦耳)。在工程单位制中，G_I的单位是$kg\text{-}mm/mm^2$。因此，G_I也可以理解为裂纹扩展单位长度所需要的力，称为裂纹扩展力。

2.3.7　应力强度因子和能量释放率关系

应力强度因子与能量释放率有一定关系。以无限宽板上有$2a$的穿透裂纹，在裂纹远处受正应力σ作用为例，如图 1.2.3-24 所示。裂纹尖端的应力强度因子为，

$$K_I=\sigma\sqrt{\pi a}$$

上述裂纹的能量释放率G_I为

$$G_I=\frac{\sigma^2\pi a}{E} \tag{1.2.3-29}$$

由此可知

$$\left.\begin{aligned}&\text{平面应力}\quad G_I=\frac{K_I^2}{E}\\&\text{平面应变}\quad G_I=\frac{(1-\nu^2)\ K_I^2}{E}\end{aligned}\right\} \tag{1.2.3-30}$$

2.3.8　弹塑性断裂力学

中、低强度钢制成的机件中如存在裂纹时，在载荷作用下裂纹尖端产生大的塑性区，其尺寸接近或超过裂纹尺寸时，通常称大范围屈服。此时线弹性断裂力学的应力强度因子K的概念已不适用。大范围屈服的断裂问题需用弹塑性断裂力学进行分析。弹塑性状态下的断裂判据有多种，目前应用较多的为裂纹张开位移COD和能量J积分判据

2.3.9 裂纹顶端张开位移COD

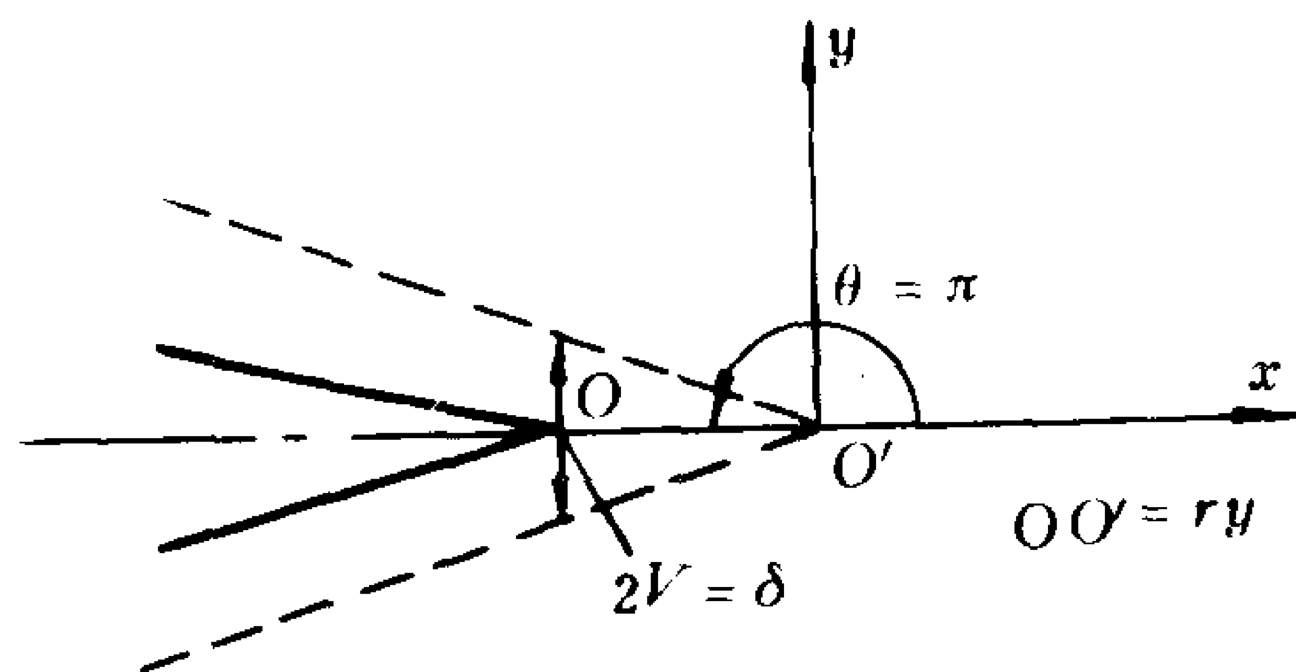


图 1.2.3-25 裂纹顶端的张开

对于中、低强度钢，在平面应力状态时，裂纹尖端附近已有较大范围的屈服区。裂纹开始扩展前，其尖端已发生明显的张开位移COD。张开位移临界值δ_C，反映材料对裂纹扩展的抗力，可以作为断裂判据的指标[14]。图 1.2.3-25 表示裂纹顶端的张开。当裂纹顶点由O扩展至O'时，裂纹长度增加了r_y，O点的张开位移为δ，则

$$\delta=\frac{8\sigma_s a}{\pi E}\cdot\ln\sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_s}\right) \qquad (1.2.3\text{-}31)$$

当应力值较低时（即在小范围屈服），

$$\delta=\frac{\sigma^2\pi a}{E\sigma_s}=\frac{K_I^2}{E\sigma_s}=\frac{G_I}{\sigma_s} \qquad (1.2.3\text{-}32)$$

裂纹扩展的临界状态

$$\delta_c=\frac{K_{IC}^2}{E\sigma_s}=\frac{G_{IC}}{\sigma_s} \qquad (1.2.3\text{-}33)$$

2.3.10 J积分

对于在弹塑性条件下的裂纹来说，能量J积分反映了裂纹应力应变场的强度，它是一个与积分线路无关的常数。对于 I 型裂纹来说，临界条件下的J积分以J_{IC}表示。J_{IC}值高的材料，应变能大，抵抗断裂的能力强，材料不易断裂。这表明J_{IC}也是反映材料断裂韧性的参量。

J_{IC}值可由实验测定。它的应用有其局限性。第一因为J积分是二维的，所以只适用于平面应力和平面应变问题。第二由于塑性变形不可逆，不允许卸载，而裂纹扩展意味着部分卸载，故J积分只适用说明裂纹扩展的开始，而不能表示整个扩展以致断裂的全过程。

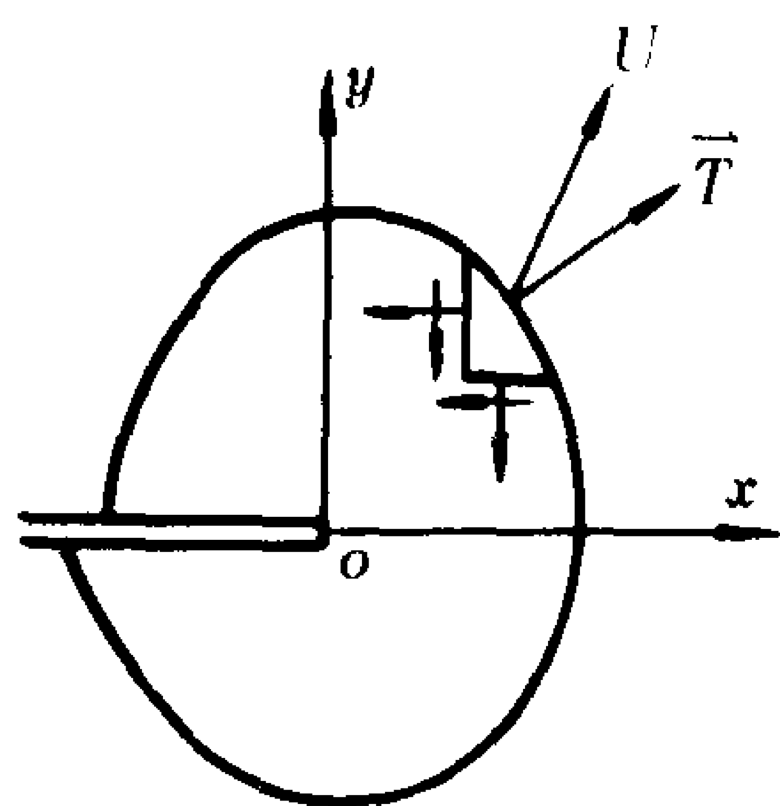


图 1.2.3-26 J积分定义

在一般二维情况下，例如有贯穿裂纹的平板，J积分可写成下式，如图（1.2.3-26）所示。

$$J=\int_{\Gamma}\left[Wdy-\vec{T}\left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial x}\right)ds\right] \qquad (1.2.3\text{-}34)$$

式中：$\vec{T}$——表示作用在积分回路Γ弧线元ds上的表面矢量；

$\vec{u}$——表示相当于$\vec{T}$处的位移矢量。

上述J积分的特点是守恒性，它和积分的路径无关。J积分线路可以接近于裂纹尖端。因此，J积分可以反映裂纹尖端附近塑性应力形变场的强弱程度，它相当于线弹性状态下K_I的作用。

在线弹性状态下，J积分等于裂纹扩展的抗力G_I，即

$$\left.\begin{aligned}&\text{平面应力}\quad J=G_I=\frac{K_I}{E}\\&\text{平面应变}\quad J=G_I=\frac{(1-\nu^2)\ K_I^2}{E}\end{aligned}\right\} \qquad (1.2.3\text{-}35)$$

2.3.11 疲劳断裂机理

在交变应力（疲劳应力）下工作的机件，即使最大的工作应力低于材料的屈服极限，经长期运转后，部分晶粒出现滑移线，在局部地区组成滑移带，产生微裂纹。微裂纹连接成宏观裂纹并扩展直至断裂。晶粒的滑移带通常集中在金属的表面、晶界及非金属夹杂物等处，并在该处形成疲劳裂纹源。

2.3.12 应力腐蚀断裂机理

由拉伸应力和腐蚀介质联合作用而引起的低应力脆性断裂称为应力腐蚀。应力腐蚀断裂有多种机理，下列为钝化保护膜破坏机理和氢致脆化两种机理。

1)钝化保护膜破坏机理　认为应力腐蚀是电化学反应起控制作用。金属在腐蚀时，表面上同时发生了阳极过程（铁溶解并放出电子）和阴极过程（吸收电子）两个电化学过程。与腐蚀介质相接触的阳极金属介面上会形成一层致密的钝化保护膜，它能阻碍阳极金属进一步的腐蚀溶解。如果机件受到一定大小的拉应力作用时，在裂纹尖端附近，由于应力集中存在很高的拉应力场，它能阻碍裂纹尖端形成钝化膜，或使已形成的钝化膜破裂。这样使裂纹尖端暴露在腐蚀介质中，成为微电池的阳极，发生阳极溶解，从而使裂纹不断向前扩展直至断裂。

2)氢致脆化机理　应力腐蚀裂纹的形成、扩散都和氢作用有关。金属腐蚀时的阴极过程，在阴极产生原子氢，扩散到正在扩展的裂纹前缘，使金属晶体的表面能降低，金属的断裂强度也随之下降，从而使金属脆化产生早期断裂。

2.3.13 氢脆断裂机理

目前，对氢脆断裂机理尚无统一认识，下列为内氢压机理和晶格脆化机理。

1)内氢压机理　该理论认为当金属材料点件中的氢超过固溶浓度时，一部分过饱和的氢在金属晶界、孔洞或其它缺陷处拆出再结合成氢分子，结果在该处产生很大的氢气压。当此压力超过材料的破坏应力时，就产生裂纹导致断裂。

2)晶格脆化机理　该理论认为在裂纹尖端处的氢原子的电子，由于过渡元素的 $3d$ 电子层未填满，氢原子的电子进入金属的 $3d$ 电子层，增加了该层的电子密度，因而加强了原子间的相互斥力，降低了晶格的结合力。当局部应力等于已被氢降低了的原子间结合力时，材料便产生脆性断裂。

2.3.14 蠕变断裂机理

晶界滑动引起的应力集中与空位的扩散为蠕变断裂的裂纹源的形成起着重要作用。由于应力和温度不同，裂纹源的形成机理也不相同。

1)晶界应力集中机理。在高应力和较高温度下，金属的晶界是粘滞性的。在外力作用下，晶界将产生滑动，于是在三个晶粒的交界处将产生应力集中。如果第三个晶粒的形变或晶界迁移，不能使应力集中得到松弛，只当集中的应力达到晶界开裂程度时，则在三个晶粒的交界处将产生裂纹。

2)晶界空洞机理。高温低应力蠕变中，裂纹常分散在各晶界处，特别容易产生在垂直于拉应力方向的晶界上。这种裂纹源的形成，首先是由于晶界滑动，在晶界台阶处受阻而形成空洞。然后由于位错运动和晶内的滑移带与滑动晶界相交割产生了大量空位，为了减少其表面能而向拉应力作用的晶界上移动。当晶界上有空洞时，便吸收空位长大成裂纹。

3　机械零件修复工艺

3.1　焊修

焊修，系指用焊接、堆焊、钎焊等工艺修复磨损或损坏了的机械零件。

焊修工艺在轮机修理中应用甚广，其优点为：能修复各种金属制成的零件，能修复零件的多种缺陷（如断裂、裂纹、磨损等），焊层的硬度和强度可以控制，焊层可以达到所需要的厚度，焊修设备简单并可到现场施工。

焊修工艺也存在严重的缺点，如：高的施焊水平才能保证焊修质量；焊修时因产生高温使零件基体金属发生结构的变化，因而改变了零件的原有的性能；焊修时受局部过热而产生巨大的内应力，有可能改变零件原有的形状（变形），甚至造成破裂。

3.1.1　钢质零件的焊修

钢质零件的可焊性相差很大，视含碳量和含其他合金元素量的多少而定。钢中含碳量愈高，出现裂纹的倾向就愈大，可焊性就愈差。合金元素有的可使可焊性变坏，如磷、硫等。有的合金元素在其含量少时，对可焊性则有利，如钛、铌等。

1）低碳钢零件的焊修

低碳钢零件的可焊性良好，施焊时一般情况下可必采取特别的工艺措施。通常选用结 42 型焊条可获得良好的焊修质量。但有时因母材与焊条的成分不合格（如含硫过高），或在低温条件下焊修刚度大的工件时，都可能产生裂纹。选用优质焊条，如结 426、结 427、结 506、结 507 等牌号，可使焊缝金属具有较好的抗裂性能和机械性能。焊修时要求施焊工艺合理。

2）中碳钢、高碳钢零件的焊修

中、高碳钢零件焊修时，主要困难是易于产生裂纹。

（1）裂纹的类型及其产生原因

①热裂纹。多产生于焊缝内，特别是在弧坑处更易出现。产生原因主要是焊缝中含碳量偏高；焊缝中含硫量偏高、含锰量偏低，也易引起热裂纹。

②冷裂纹。多出现在焊缝区的母材上，有时也在焊缝上出现。产生的主要原因为，钢材含碳量增高后，淬火倾向也相应增大，易产生塑性低的淬火组织；当工件刚度较大时，则会引起大的焊接应力，而造成裂纹。

③热应力裂纹。其出现的部位多在刚度大焊件的薄弱断面上，发生在冷却过程中。产生的主要原因为焊接区的刚性过大，致使焊接区不能自由收缩而造成巨大的焊接应力，此时，由于焊件薄弱断面承受不了此应力而引起裂纹。

（2）预防裂纹的措施

为了保证中、高碳钢零件在焊修时不出现裂纹，并得到满意的机械性能，常采取以下预防措施：

①预热。预热是主要措施，有利于降低热影响区的最高硬度，防止产生冷裂纹和热应力裂纹，改善焊缝的塑性，以及减少焊后的残余应力。预热温度，对于 35 号和 45 号钢制造的零件为 150～250℃；含碳量更高或零件的刚度很大时，须提高到 250～400℃。零件最好采用整体预热。

②选用合适的焊条。焊缝要求高的，应选用结 707 或结 607 牌号的焊条；要求一般的，可选用结 506 或结 507 等牌号焊条。应尽可能地选用碱性低氢型焊条，其抗裂性能好。在特

殊要求时，可采用铬镍不锈钢焊条，即使在不预热情况下，也不易产生近焊缝区的裂纹。

③尽可能减少母材熔入焊缝金属中的比例。

④焊后应进行热处理，消除焊接应力。

3.1.2 铸铁件的焊修

在轮机中铸铁零件占有很大的比重。铸铁零件在使用中可能会发生开裂、破洞、缺损和局部磨损等等损伤。采取铸铁焊补修理恢复损伤零件，有着重要的经济价值。

1)铸铁焊修的特点

焊修铸铁零件时常产生的缺陷是出现白口和裂纹。

(1)产生白口的主要原因。

产生白口的主要原因是由于焊补冷却速度过快和石墨化元素不足。在一般条件下，焊补区的冷却速度比铸造时的冷却速度要快得多，同时在焊缝内因碳、硅等石墨化元素被烧损，而影响石墨析出，故易形成白口。

(2)预防白口的措施。

预防措施有：调整焊缝的化学成分，增加焊缝区的石墨含量；采用非铸铁焊料（如镍基和铜基合金、高钒钢等）；降低冷却速度、延长熔化区处于红热状态的时间使石墨充分地析出；采用钎焊法，即焊补时母材不熔化，等等。

(3)预防热应力裂纹的措施。

热应力裂纹产生的原因同 3.1.1 中 2)。裂纹的部位可能在焊缝上，或在热影响区。预防的主要措施是从减小或消除焊接应力着手，如采取热焊法，即焊前将工件整体加热到 600～700℃并在焊补时设法保温、焊后再升温至 700℃，然后缓冷；采用冷焊法，即焊前不预热或低温预热，焊补时尽可能减少输入焊区的热量(如小电流、断续焊、分散焊等)，以减少焊区与工件之间的温差；采取对减应区加热法，即选择工件上适当的部位作为减应区，加热使其伸长，再对损坏区进行焊补，焊后同时冷却，可显著减少焊接应力。

(4)预防热裂纹的措施。

热裂纹产生的原因同 3.1.1 中 2)。预防方法主要从改变焊补工艺着手，主要措施为：改变熔池的形状，避免窄而深的熔池，在坡口底部应带圆角，以改变焊缝的受力方向；尽量减少母材溶入焊缝的比例，采用小电流、上坡焊及半立焊等；减少焊缝金属在红热状态下的时间。

2)铸铁零件热焊法

(1)传统热焊工艺。

传统的热焊工艺是将焊件放在炉内整体缓慢加热到 800℃，并在此温下进行焊补，然后缓慢冷却至常温。

(2)热焊新工艺。

新工艺是将焊件在炉内整体缓慢加热到 180～200℃，再以 600～800℃/h 的温升速度加热到 350～400℃后，放入保温装置内进行焊补。焊缝坡口角度要开得大些(不小于 120°)。可采用电弧焊或气焊以不小于 100 m/h 的速度作逆向分段施焊，并由两端向中间焊。焊后的冷却速度应不大于 40℃/h 缓慢冷却，冷却时间一般为 24 h，最好为 48 h。

(3)焊条选择。

铸铁零件热焊所用的焊条为铸铁焊条，如钢芯铸铁焊条、钢芯球铁焊条、高钒铸铁焊条、镍基焊条及铜铁铸铁焊条等。

3）铸铁零件冷焊法

铸铁零件冷焊的方法较多，按所采用的焊料不同可分为3类：（1）低碳钢焊条冷焊法，（2）铸铁焊条冷焊法，（3）铜铁焊条冷焊法。

铜铁焊条的特点为抗裂性好，因焊条中铜占75%以上，使焊缝金属为铜基上夹杂碳钢颗粒的机械混合物，故塑性好而强度不高，而有松弛焊接应力的作用。

施焊时为了减小焊区与整体之间的温差，应使焊区尽量少受热，故采取短焊、分散、断续焊法。焊接电流以小为原则，电流大会增加熔深和熔合区白口的厚度；但电流也不宜过小，过小会造成焊不透和夹渣等缺陷。

4）球墨铸铁零件的焊补

球墨铸铁焊补较灰铸铁焊补困难得多，原因为：作为球化剂的镁在焊接时极易烧损，使焊缝中的碳难以球化；同时，镁还是白口化的元素；此外，球墨铸铁的弹性模量和体积收缩量比灰口铸铁大，焊补区产生的拉应力和因拉应力而造成的裂纹倾向大。

提高球墨铸铁零件焊补质量的途径为：采用钢芯球墨铸铁焊条焊补，因焊条药皮中含有石墨化剂和球化剂，可使焊缝成为球墨铸铁；焊补时将工件先预热，焊后缓冷，再进行热处理，使焊缝的组织性能与母材相近；采用气焊工艺，因气焊火焰可预热工件，且气焊火焰比电弧温度低得多，以减少镁的烧损。

5）铸铁零件的钎焊焊补

铸铁钎焊焊补的特点为，焊补速度快，工件受热不大，不会产生白口及裂纹等缺陷。

铸铁钎焊常采用黄铜焊丝作为钎料，如牌号为料103的黄铜焊丝，含铜52～56%，余为锌，熔点为885～890℃。为提高焊补接头的强度，近年来国内已研制出高强度钎料，其成分为：铜48～50%，锰9～10%，镍3.50～4.00%，铝0.30～0.40%，锡0.40～0.60%，余为锌。钎料的液相线温度为830℃，配用以硼酸为基的溶剂。焊补前，对焊补区要严格清洁，所开坡口的深度为焊补件厚度的4/5以上。采用氧—乙炔硬钎焊时，要先预热坡口，并将表面石墨烧去，然后迅速撒上溶剂，用气化焰将溶剂均匀熔化。使用这种高强度钎料焊补铸铁零件，焊接接头的强度不低于母材，切削性良好，质量高。

3.1.3 铝合金零件的焊补

1）铝合金焊接的特点

铝合金焊接的主要特点为：在铝合金表层上有难熔的氧化铝薄膜，焊接时此薄膜会阻碍金属之间的良好结合，并易生成夹渣和气孔；铝的导热系数比铁大，故焊接时要使用大功率的焊接热源；铝凝固时的收缩率比铁大2倍，故工件变形大、易产生裂纹；铝在高温时强度低，常不能支持自身的重量，焊接时易发生坍塌现象；铝焊接熔池凝固时氢要向外逸出，当凝固时间短时，则氢来不及逸出留在焊缝中形成气孔。

2）铝合金零件的气焊焊补

（1）气焊焊补铝合金零件时，焊丝选用丝311牌号，其含硅4～6%、熔点为580～610℃。焊粉采用粉401牌号，其主要成分是卤族元素的碱金属化合物，能有效地破坏氧化铝膜。采用上述焊丝和焊粉焊补时，金属的流动性好，焊缝成型良好并有较高的抗热裂性能，焊缝的成分和机械性能接近母材。

（2）零件在焊补前，如壁厚大于5 mm，应开60°的 V 型坡口。

（3）焊补时可用气焊火焰对工件进行预热（预热温度为200～300℃）。焊补时，应采用中性焰或弱碳化焰。焊嘴与零件的倾角约为20～30°，如图1.2.3-27所示。焊后最好对焊件进

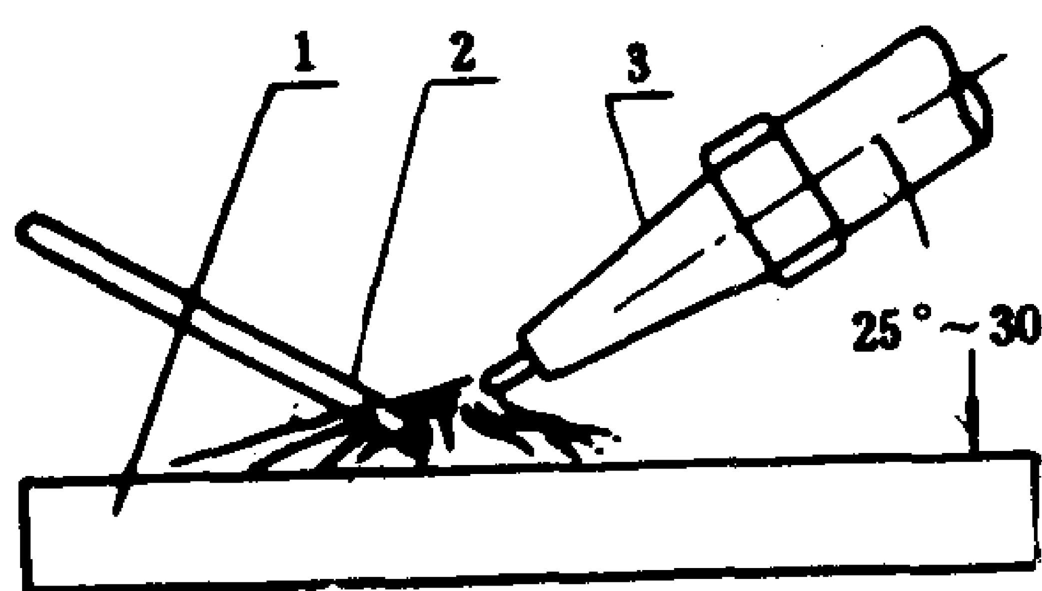


图 1.2.3-27　气焊铝合金
1-零件；2-焊丝；3-焊枪

行退火，退火温度为 300～350℃。

3)铝合金零件氩弧焊焊补

氩弧焊是以氩气为保护气体的一种电弧焊接法。施焊时，氩气从喷嘴流出，在电弧和金属熔池周围形成封闭气流，以保护钨极和熔池金属不被氧化，且可使电弧稳定、热量集中、焊缝成型美观。氩弧焊是铝合金焊补的一种较完善的方法。

采用氩弧焊焊补铝合金时，以采用手工钨极及交流电源为宜。钨极选用含有氧化钍的钍钨极和含有铈的铈钨极，焊丝选用丝 311 牌号，氩气纯度要求不低于 99.90%。

3.1.4　堆焊

船机零件磨损、腐蚀后，常采用堆焊方法恢复其尺寸和形状。堆焊工艺的原理及方法，与一般的焊接方法基本相同。堆焊的优点为：生产率高、可快速地获得大厚度的堆焊层；可获得高硬度的表面堆焊层；堆焊层与基体的结合强度高；修理费用低等。堆焊的缺点主要有：焊缝和热影响区易产生裂纹；修复的零件其疲劳强度不如原件高。

1)手工堆焊

普遍采用手工电弧焊和氧—乙炔气焊进行堆焊，其操作与普通焊接基本相同，但应针对工件和堆焊材料的具体情况，采用不同的工艺，以获得较好的效果。例如，对于硬度高、刚度大的零件，在焊前应预热和焊后缓冷等措施，以防止产生裂纹。采用气焊堆焊时，应使用中性焰，甚至碳化焰，以防合金元素烧损。

堆焊材料的选用：恢复尺寸堆焊时，可选用普通结构钢焊条或焊丝；当对堆焊表面层有特殊要求时，则需选用专门的合金材料焊条或焊丝。

2)埋弧堆焊

埋弧堆焊较之手工堆焊有如下优点：熔敷效率高，焊缝质量好，飞溅损失小而可节约合金元素，热能利用高，机械化程度高等。埋弧焊特别适合于修复磨损大而外形简单的零件，如各种轴类零件。

堆焊材料包括焊丝和焊剂，两者配合使用可调节焊层的成分。目前，我国多选用中、高碳钢焊丝，也有选用 30 CrMnSi 和 50 CrV 焊丝。焊剂最常用焊剂 430 及焊剂 431 牌号，都是高锰、高硅型的，性能较好。

3)振动堆焊

(1)振动堆焊原理及设备，如图 1.2.3-28 所示。焊接电流从直流电源 1 的正极经焊嘴 4、焊丝 3、工件 2 和电感器 1 回到电源的负极。焊丝从焊丝盘 7 经送丝轮 6 进入焊嘴 4，送丝轮由电动机 9 驱动。焊嘴受交流电磁铁 5 和弹簧 10 的作用产生振动。为了防止焊丝熔化时与焊嘴粘住，焊嘴由冷却液冷却。为了控制堆焊层的硬度和工件的温度，由喷液嘴 11 向焊层或工件上喷射冷却液。堆焊过程自动进行，工件 4 夹在专用机床的主轴卡盘上旋转，焊丝等速下降并同时振动和沿工件轴向移动。堆出的焊缝是螺旋状的，并覆盖需堆焊的全部表面。

(2)振动堆焊用于焊修零件的优点为：基体金属熔深浅，堆焊层薄而均匀，层厚可在 0.5～3 mm范围内变动；焊层冷却快，硬度高，不经热处理而可获得高的耐磨层；基体金属受热少，焊接变形小；堆焊过程自动进行，生产率高等。堆焊已成为我国目前用于修复磨损

零件的主要方法，常用于修复零件的外圆柱面、球面、花键槽及平面等。

（3）堆焊焊丝常采用直径为1.60～1.80 mm的中碳或高碳优质碳素钢丝，其中硫、磷的含量应低于0.03%，以减少焊层产生裂纹的倾向；选用30 CrMnSi合金钢丝，可使焊层不易产生裂纹和气孔。

（4）振动堆焊时，用水蒸汽作为保护介质喷入堆焊区，可显著地提高堆焊质量。这因为水蒸汽将空气隔离，对熔池金属有搅拌作用，而有利于液体金属中气体逸出，大大减少焊层中的气孔和夹渣。

（5）二氧化碳保护下的振动堆焊，可获得更高的堆焊质量。因二氧化碳在电弧的高温作用下，分解为一氧化碳和氧。氧和二氧化碳同时对熔池中的铁、锰和硅作用，所生成的SiO_2、MnO成熔渣浮在熔池表面，而不会影响焊层质量。

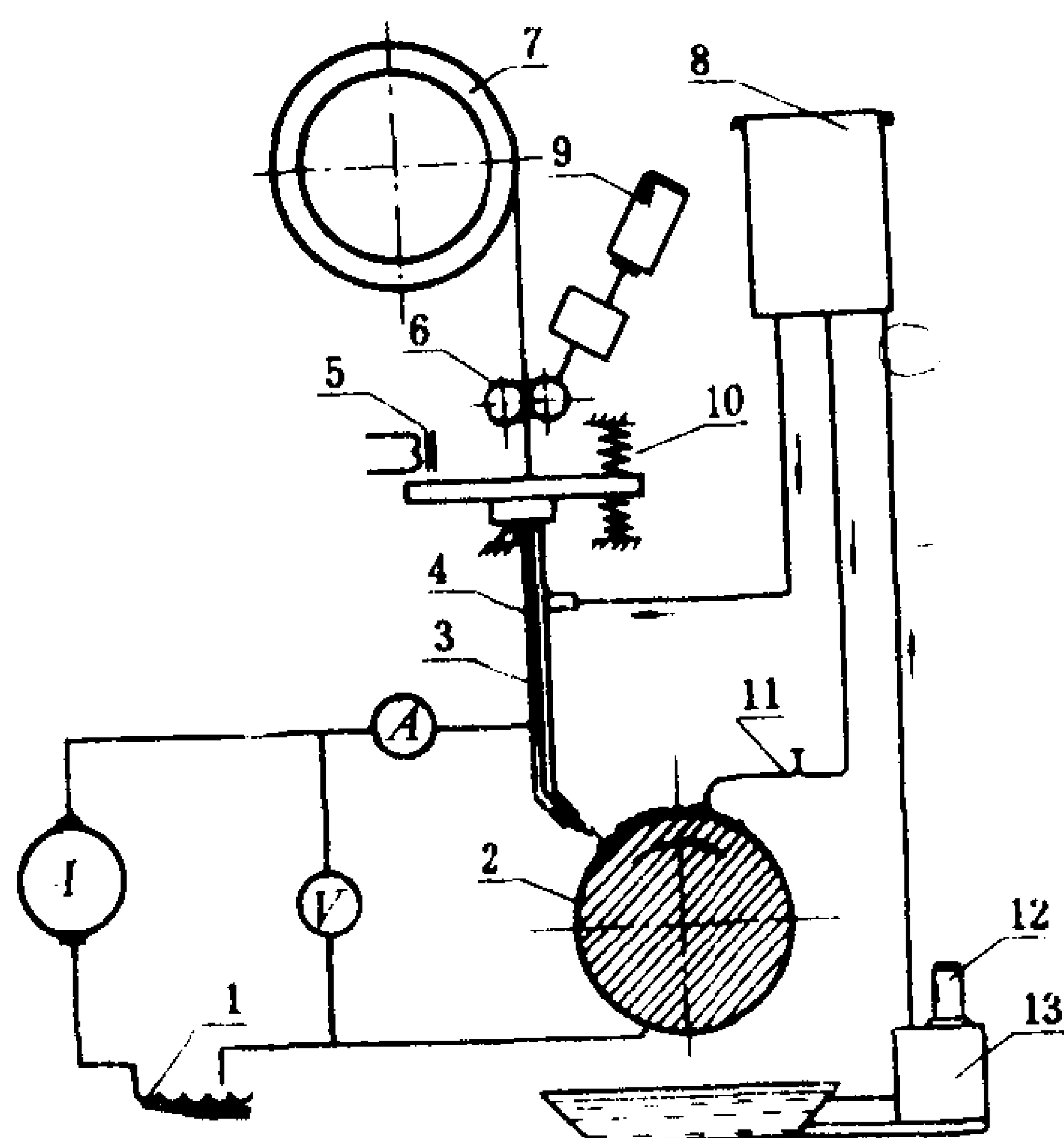


图1.2.3-28　振动堆焊过程示意图

1-电感器；2-工件；3-焊丝；4-焊嘴；5-电磁铁；6-送丝轮；7-焊丝盘；8-上水箱；9-电动机；10-弹簧；11-喷液咀；12-水泵；13-冷却液箱

3.1.5　火焰喷焊

1）火焰喷焊，是采用氧—乙炔火焰将合金粉末加热后，喷涂并熔合在零件表面上，形成堆焊层。火焰喷焊既可用于提高新制零件表面的性能，又可用于修复零件的磨损或腐蚀表面。

2）火焰喷焊工艺过程可分为3个步骤：（1）工件预热，（2）喷涂合金粉末，（3）将涂层加热使之与基体金属熔合。这3个步骤由经改装过的氧—乙炔喷枪一并完成。此类火焰喷枪的结构，如图1.2.3-29所示。

3）火焰喷焊采用的合金粉末有如下3类：（1）镍基，其化学成分为 Ni—Cr—Fe—B—Si；（2）钴基，其化学成分为Co—Cr—W—Fe—B；（3）铁基，其化学成分为Fe—Cr—B—Si。这3类粉末的性能基本相同。

4）火焰喷焊的优点为：可喷焊各种合金粉末，可使工件喷涂表面能分别获得耐磨、耐热、耐腐蚀等性能；喷焊层薄而均匀，厚度可控制在0.10～1.50 mm之间，且表面光滑、成型好，多数情况下不需加工即可使用；设备较简单，易于推广。此工艺不足之处为：用手工操作，生产率低；基体金属热影响巨大，易发生过热或溶化而破坏原有热处理状态；外形复杂的或薄壁工件喷焊困难；因火焰温度限制，熔点很高的粉末不能喷焊。

3.1.6　等离子弧喷焊

1）等离子电弧及其特性。

气体受热时产生电离。电离充分的气体称为等离子体，其中，正、负离子总电荷相等，故等离子体呈中性。一般焊接电弧弧柱温度高达6000～7000 K，弧柱气体中相当一部分已呈等离子状态。如对这种自由电弧弧柱进行“压缩”则可使之成为更细的电弧束，其能量更集

中。此时，如向电弧吹送氩或氮气体，则可获得等离焰流，常称等离子电弧。生产上可通过焊枪对自由电弧柱进行压缩而得到等离子电弧。有 3 种压缩形式，如图 1.2.3-30 所示。

（1）机械压缩，见图a)。自由电弧通过焊枪喷嘴细孔道时，弧柱直径则被迫缩小；

（2）热压缩，见图b)。在焊枪中，同时有高速气流通过，均匀地包围着弧柱，并将弧柱的热量不断地带走，使其外层温度下降，则外层气体电离的程度也急剧地降低，而迫使带电离子流向高温高电离程度的弧柱中心区集中，致使弧柱变细；

（3）电磁收缩，见图c)。电离子流在两根平行且同方向电流的导体之间通过，在自身磁场的作用下产生相互吸引力而使导体相互靠近，且距离越近吸力越大。在上述机械压缩和热压缩作用下已被压缩变得很细的弧柱，由于这种吸引力的作用变得更细，称之为电磁收缩效应。

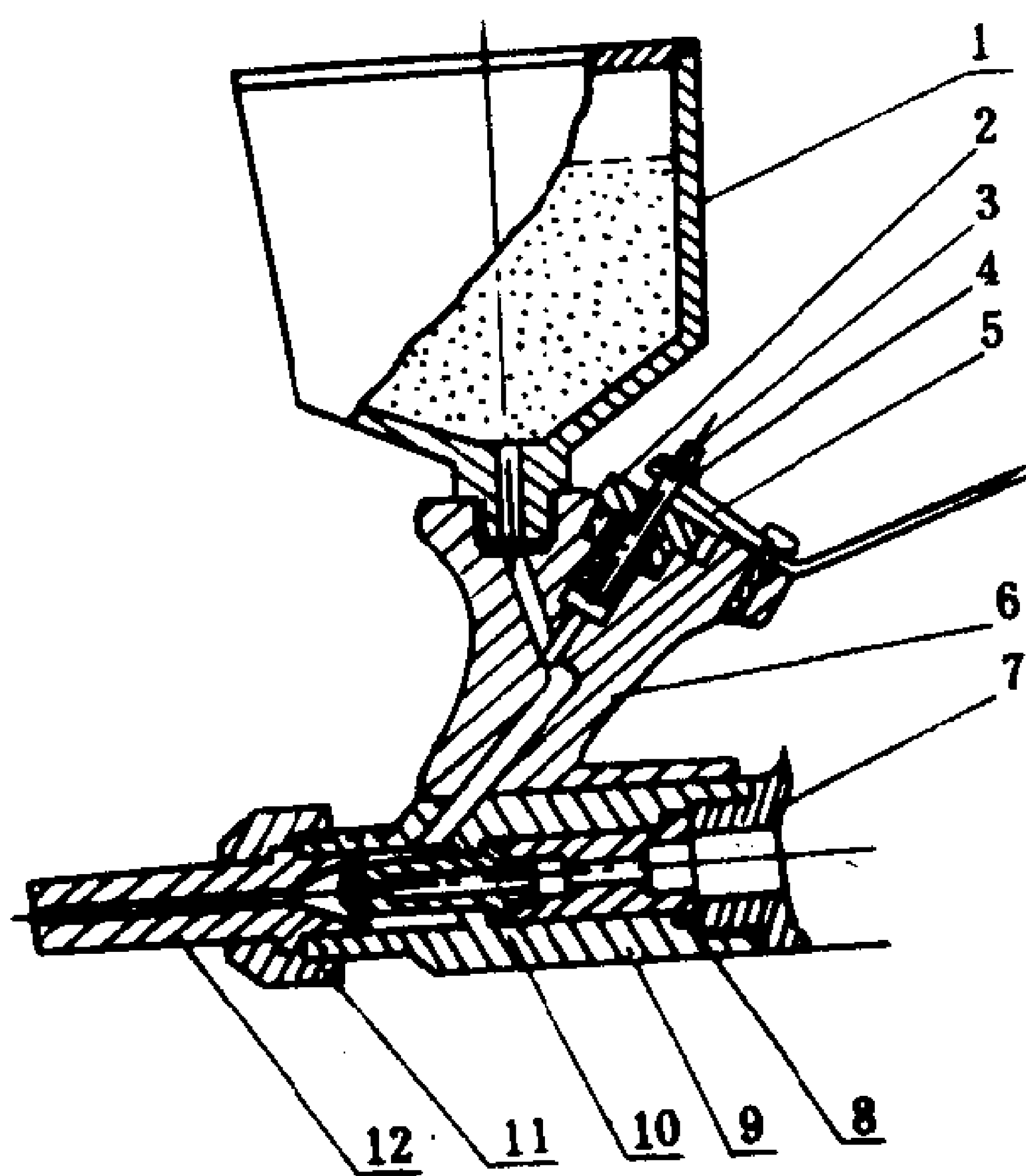


图 1.2.3-29 火焰喷枪的结构

1-粉斗；2-压帽；3-调节杆；4-调节螺母；5-送粉开关；6-连接体；7-焊枪体；8-混合管；9-轮体；10-注射管；11-连接螺母；12-焊枪喷管

经上述 3 种效应作用下的弧柱能量高度集中，达到与电弧热扩散等作用相平衡，而形成稳定的等离子电弧，其温度高达 15000～30000 K，可熔化所有的工程材料。

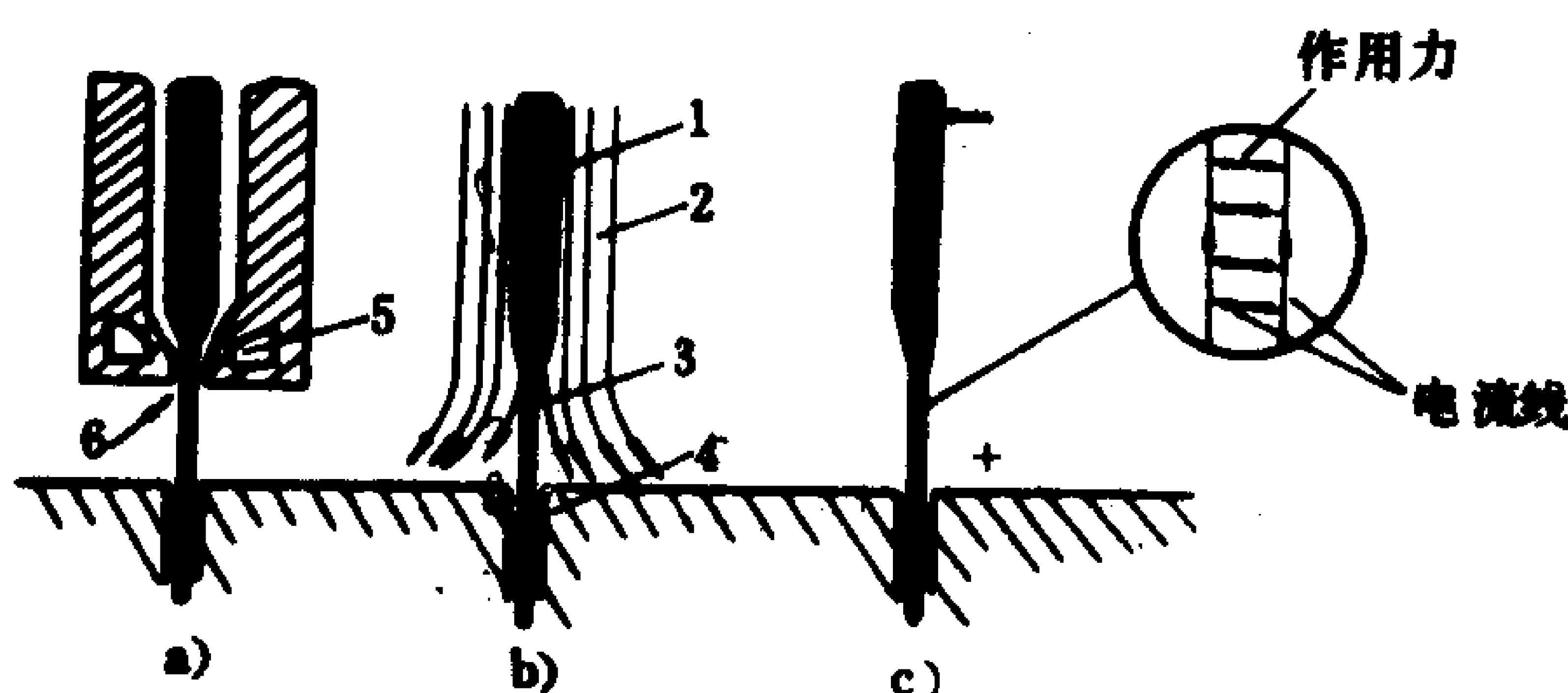


图 1.2.3-30 等离子弧压缩效应

1-钨极；2-冷却气流；3-电弧；4-工件；5-冷却水道；6-细孔

2)喷焊材料。

喷焊所采用的工作气体有氩、氦、氮、氢等。氩、氦为单元子气体，易形成等离子体，又是惰性气体，不与其他元素化合，减少合金元素的烧损。缺点是工作温度高、辐射损失大、价格高(尤其是氦气)。目前主要采用氩气作为等离子喷焊的工作气体。

喷焊电极应选用发射电子能力强而自身烧损少的材料，目前以含钍 1.50～2.50%的钍钨极使用较广。

喷焊合金粉末的要求与火焰喷焊同，只是对其熔点没有限制。

3)喷焊工艺要合理选择下列工艺参数：电流强度、工作电压、工作气体流量、送粉气体流量、送粉量、堆焊速度等，以保证喷焊过程的稳定和喷层质量。

3.2 金属喷涂

金属喷涂，是用高速气流将逐渐熔化的金属丝或金属粉末吹成雾状，喷涂到经过处理的零件表面上，形成一层覆盖物。此喷涂层与零件的结合系机械结合。

金属喷涂是修复磨损零件的主要方法之一，常用于修复磨损了的船机零件，如尾轴、气

阀、活塞等。喷涂的优点为：工件受热很小(70～80℃)，不会引起变形和破坏金相组织；喷涂层为多孔组织，储油性好，改善了润滑条件；喷涂层的厚度可以较大，并不受基体材料性能的限制；可喷涂金属材料，也可喷涂塑料、陶瓷等。喷涂的缺点为：因喷涂层与基体是机械结合，故连接强度低；喷涂层本身抗拉强度低，不能承受较高的线压力和点压力；喷涂时因熔化的材料颗粒溅开与滑走较多，材料损耗大。

3.2.1 金属电喷涂

金属电喷涂，是利用电弧热将金属丝熔化，同时用压缩空气将熔化的金属吹成雾状，喷射到工件表面上形成涂层。

1)喷涂层的形成过程。

金属电喷涂的原理，如图 1.2.3-31 所示。两根金属丝 2 由送丝轮 1 等速向前送进，并分别接在电源的两极上。两金属丝会合处产生电弧，将金属丝的尖端不断地熔化。熔化的金属立即被喷咀 3 喷出的高速气流吹成直径为 0.01～0.04 mm 的雾状颗粒，以 140～300 m/s 的高速射在工件表面上，形成喷涂层 5 。

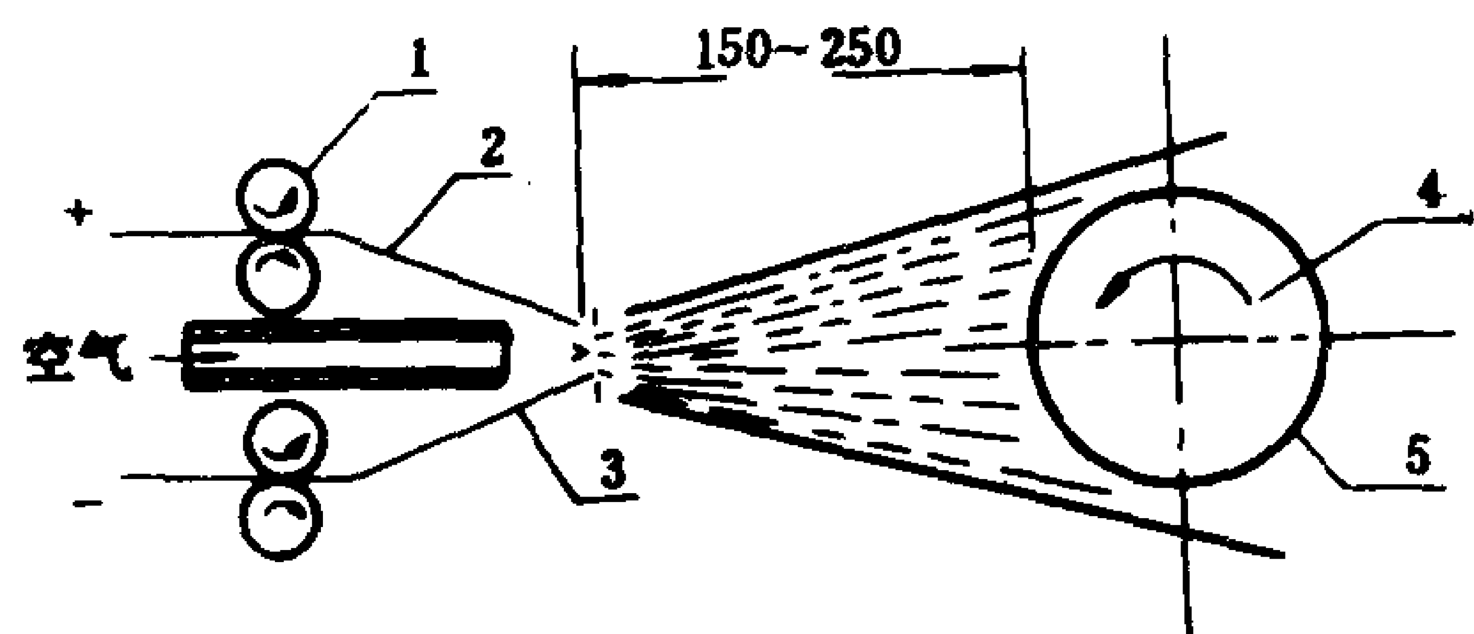


图 1.2.3-31 金属电喷涂原理

1-送丝轮；2-金属丝；3-喷咀；4-工件；5-喷涂层

高温液态的金属颗粒，自喷嘴飞到工件表面(约 150～250 mm)，会产生强烈地氧化和氮化，达到工件表面时，颗粒的外表已包着一层氧化膜和氮化膜，影响了涂层与基体的连结强度和涂层的性能。

2)喷涂修复工艺。

应用电喷涂修复零件，其工艺过程分为如下 3 个步骤：

(1)喷涂前零件表面的准备工作。包括除油、除锈、表面粗糙处理以提高涂层与基体的连结强度。

(2)喷涂。合理选取送丝速度、压缩空气压力、喷嘴与工件的距离、工件转速等。送丝速度与电压、电流正确配合可保证喷涂过程连续而稳定。压缩空气压力过低则熔化颗粒雾化不良，过高则雾化过度，致使颗粒过小而轻，达到工件表面时冲击力不足，则影响结合强度，空气压力常取 0.55～0.60 MPa。喷射距离过大过小均不利，常取 150～250 mm。喷涂时工件的转速，对于直径为 70～100 mm 的轴颈，一般取为 10～15 r/min。

(3)喷涂层的加工，包括渗油处理和机械加工。渗油处理是将涂层浸入 80～100℃的润滑油中浸泡 8 ～10 h，以使涂层储油而提高耐磨性。机械加工采取车削或磨削，车削时要用硬质合金车刀，并选取小的切削用量；磨削时应选用粗粒度的软砂轮。

3.2.2 金属气喷涂

金属气喷涂的原理及工艺与电喷涂基本相同，不同之处仅为，气喷涂是用氧—乙炔火焰熔化金属丝，且只用一根金属丝。金属气喷涂所用的气喷枪，如图 1.2.3-32 所示。图中，金属丝 2 由送丝机构 1 等速地送到喷射头 6 的中心，此时，氧和乙炔气体送到气锥部混合在雾化头处燃烧，将金属丝熔化。与此同时，压缩空气将不断熔化的金属吹成雾状颗粒，喷涂在工件表面上，形成喷涂层。

3.2.3 等离子电弧喷涂

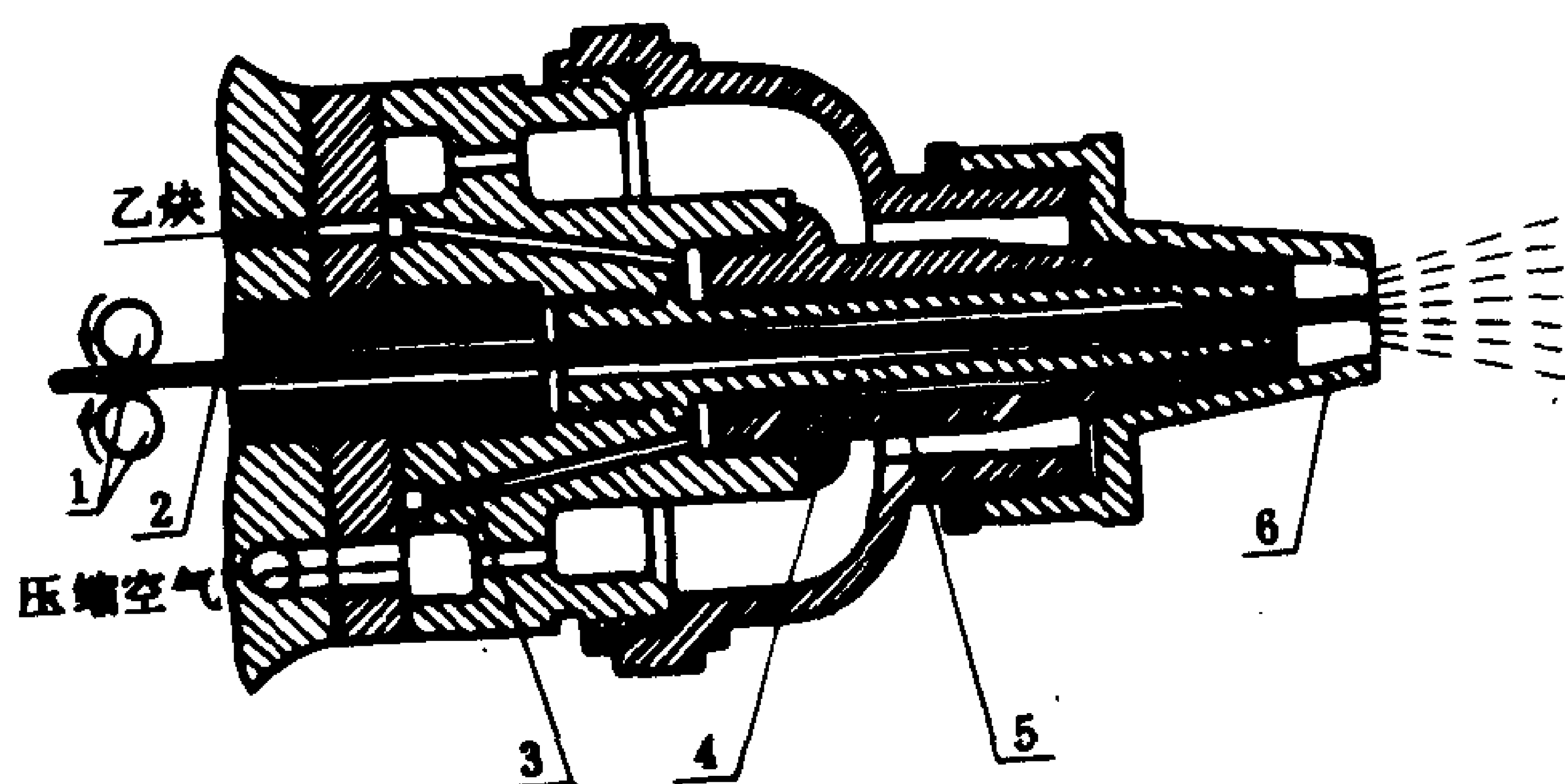


图 1.2.3-32 金属气喷枪的构造

1-送丝机构；2-金属丝；3-接头；4-金属丝通道；

5-气体通道；6-喷射头

1)等离子电弧喷涂，是用等离子弧作为热源熔化喷涂材料，它较之电喷涂和气喷涂的优点为：因等离子弧温度达 10000℃以上的高温，故喷涂材料不受熔点高的限制；用等离子弧熔化的金属颗粒，达到工件表面时温度亦很高，有可能使工件喷涂面金属部分熔化而与涂层形成冶金结合，而显著地提高了结合强度；由于金属颗粒从等离子弧喷嘴射出的速度很大，致使涂层的致密性显著提高，而提高了涂层的强度和涂层与基体的结合强度；等离子弧可通过工作气体调节成惰性或还原性，则可减少金属颗粒的氧化，减少涂层中的杂质。

2)等离子喷涂所使用的设备及材料与等离子喷焊基本相同，工艺也大同小异。

3)在船机零件修复中，等离子喷涂可用于对曲轴、尾轴、气缸套、气阀、刹车摩擦片等零件喷涂各种耐磨合金粉末，以修复磨损表面或提高新制零件的耐磨性。喷涂层的厚度以不大于 0.50 mm 为适宜，厚度误差可控制在 0.03 mm 左右。

3.3 电镀

电镀是将工件浸入金属盐溶液中，并接直流电源的阴极；阳极采用可溶性或非溶性材料制成，接直流电源的正极。在电流的作用下，溶液中的金属析出，沉积到工件表面上而形成金属镀层。电镀较之焊修、喷涂的特点为：电镀过程在低温下进行（溶液温度一般为 15～105℃），基体金属的性质基本不受影响；电镀层与基体金属的结合强度很高；镀层的厚度可以精确地控制，达到较高的尺寸精度。常用于修复零件的磨损，提高零件的抗腐蚀性，作为零件表面的装饰性镀层，等等。

3.3.1 镀铬

1)镀铬层的性质。

铬层的硬度可高达 HV 400～1200，当零件受热达到 300～500℃时，铬层的硬度几乎不变，至 700℃时硬度才开始下降。

铬层具有较高的化学稳定性，在潮湿大气中很稳定，能长期保持光泽。

铬层与基体金属有很高的结合强度，此结合强度可高于铬层自身晶间的结合强度。

铬层的滑动摩擦系数低，只有钢或铁的 50%左右。

铬层的主要缺点为：性脆，只能承受均匀分布在其上的载荷，当遭受集中的冲击力时易破碎；铬层强度随其厚度增加而降低，故一般不大于 0.30 mm。

2)镀铬原理。

镀铬时，工件接阴极，阳极为铅锑合金。镀槽内装有电解液，其成分是铬酐（CrO_3）和硫酸（H_2SO_4）。电解时，在阴极，阳离子获得电子使金属铬沉积到零件表面上，并放出氢气。其反应过程为六价铬直接还原为金属铬，及六价铬还原为三价铬、二价铬，再由二价铬还原

为金属铬。

3)铬层的种类及其用途。

(1)硬质铬层。镀铬时，电流密度及电解温度对铬层的性质起决定性的影响。可以在一定配方的电解液中，通过改变电流密度和电解液的温度，获得3种不同的硬质铬层，即：①灰暗铬层，是在较低的电流密度下得到。此铬层硬度高(HV 1200)、韧性差、有网状裂纹、结晶粗大和颜色灰暗，用途不多，只用于某些刀具、量具上。②光亮铬层，是在中低电流密度和电解液温度下获得的。此铬层硬度较高(HV 900)、韧性较好、耐磨、内应力小、有密集的网状裂纹、结晶细致及表面光亮，适合于修复磨损零件，当用于受冲击载荷的零件时，铬层应经除氢处理。③乳白色铬层，是在高温低电流密度下获得的。此铬层硬度较低(HV 400～500)、塑性好、无网状裂纹、结晶细致、呈乳白色，适用于受冲击零件恢复尺寸(如修理曲轴轴颈磨损尺寸）和装饰镀层。

图1.2.3-33所示，为电解液不变时，在不同电流密度和电解液温度配置下，3种镀铬层的形成区域。

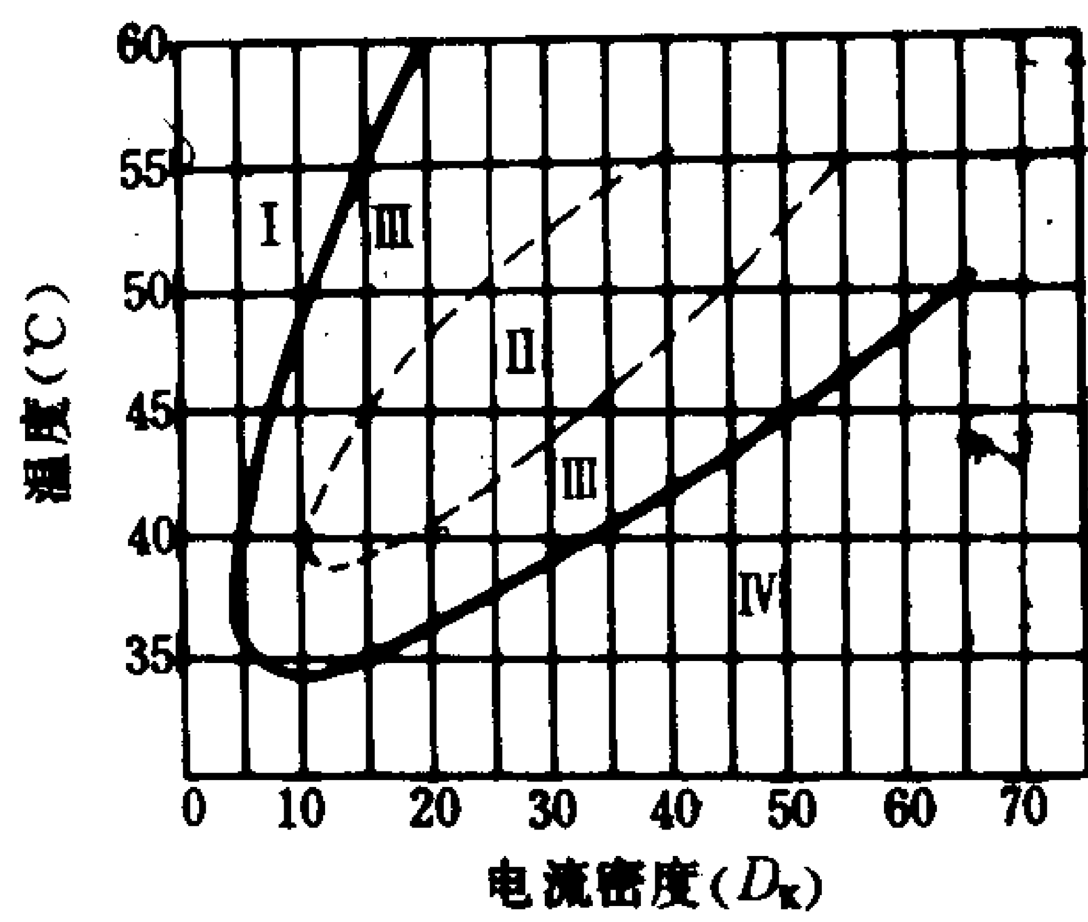


图1.2.3-33 电流密度及温度对镀铬层性质的影响

I-乳白色铬层区；II-光亮铬层区；III-半光亮铬层区；IV-灰暗铬层区

(2)多孔性铬层。镀铬时，在镀硬质铬层的基础上，按如下方法处理后可获得多孔镀铬层：①电化学法，是将已镀好硬质铬的零件改接电源正极，在电解液中作短时间的阳极处理。此时，原铬层网纹槽的边缘处先会溶解，使网纹逐渐加深加宽，呈现出清晰的网状裂纹而形成多孔性铬层。如果镀铬层原有网纹细密，阳极处理后就成点状，如图1.2.3-34 a)所示，如原有的网纹稀宽，阳极处理后则成沟状，如图1.2.3-34 b）所示。②机械加工法，是在镀铬前，将工件表面采用喷砂、车螺纹或滚花，使之具有一定的网纹或坑洼，再进行镀铬，这样，原来的网纹或坑洼就会复制出来，形成多孔状。

多孔性铬层增加了铬层对润滑油膜的吸附力，显著地改善了铬层表面的润滑性能，故常用于气缸套、活塞环、活塞销、曲轴轴颈等零件。例如，发动机气缸套进行多镀铬后，较之不镀铬时，其磨损要低5～7倍。

3.3.2 刷镀

1)刷镀原理

常用镀铬法，其阴极与阳极之间没有相对转动或移动。刷镀镀铬，是采用阴极旋转、并使用循环的电解液，以及用刷板涂刷阴极（工件）的表面。刷镀工作原理如图1.2.5-35所示。刷镀时，阴极缓慢旋转，其线速度一般为0.18 m/s，阳极采用铅合金制成。镀铬槽中的铬酐溶液，在机械搅拌作用下，以及因浓度和温度变化中，则产生对流、扩散等。刷镀中，刷板密贴在阴极表面上，刷板由数层玻璃

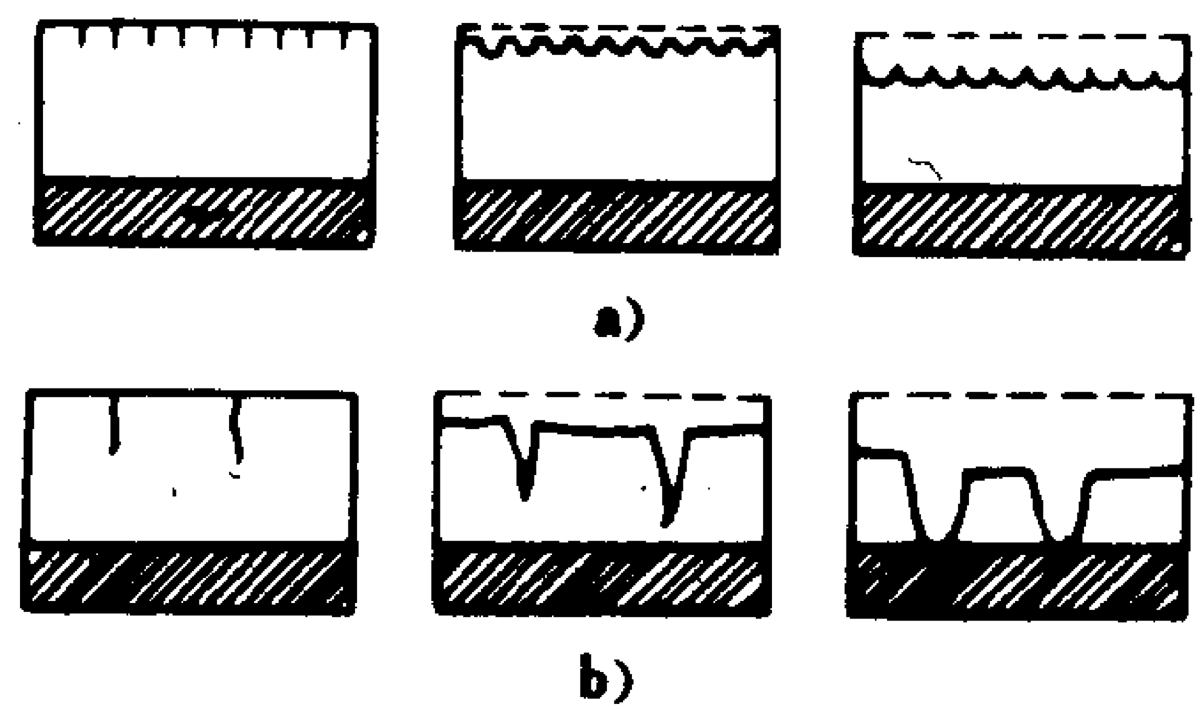


图1.2.3-34 多孔性铬层

a)点状多孔性铬层的形成；

b)沟状多孔性铬层的形成

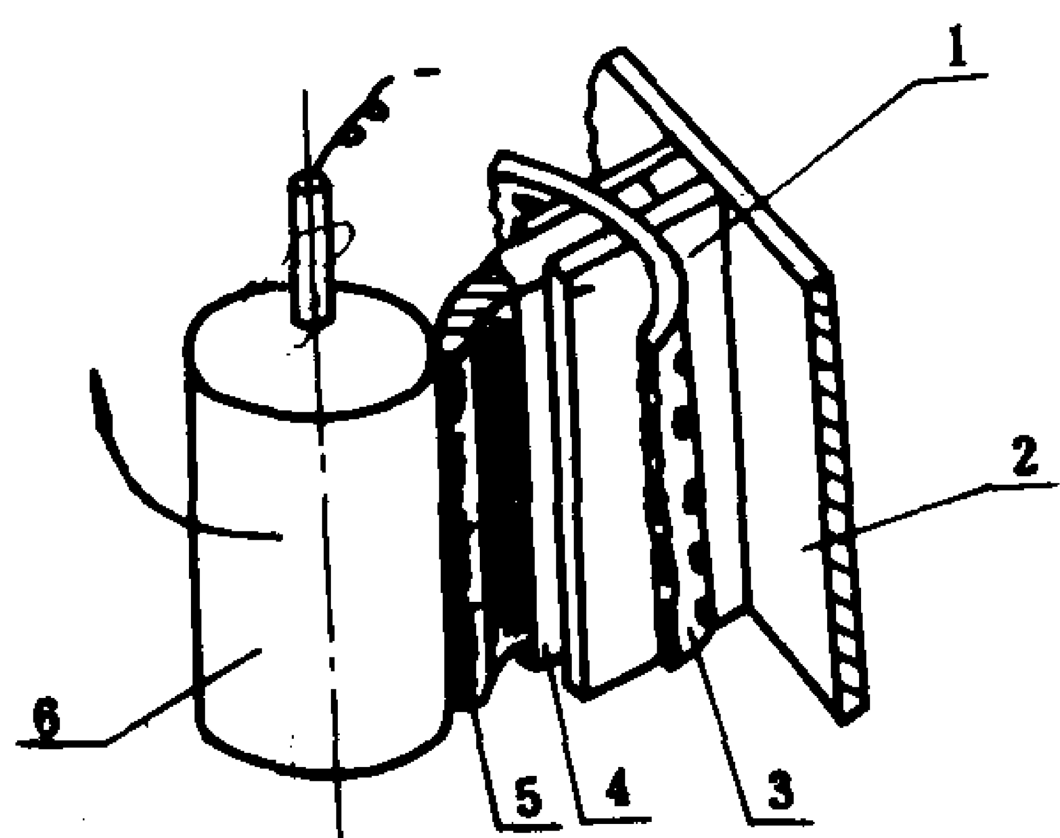


图 1.2.3-35 刷镀装置

1-刷板座；2-镀槽；3-阳极；4-刷板；
5-玻璃纤维刷；6-工件（阴极）

纤维布叠制成的刷子和固定夹板两部分组成，刷子的长度应比工件镀铬面长 8 ~10 mm。

2)刷镀的特点及其应用

刷镀的特点为：设备简单，工艺简便易行，镀层与基体的结合强度高，沉积速度快，不会引起零件变形，镀层尺寸能精确控制，镀后一般不需要加工，可用于多种镀层。

刷镀属于无槽电镀，可用于不拆卸机件进行局部电镀修复，可在现场作业。刷镀特别适用于修复面积小、镀层薄且性能要求高的精密贵重并在加工中超差的零件。

刷镀镀层的厚度一般为 0.01~1 mm。局部沟槽和严重擦伤的修理，镀层厚度可达 3 mm。

3.3.3 镀铁

由于镀铬工艺成本高、效率低和易污染环境等缺点，在修理中已逐渐被镀铁(又称镀钢)所代替。镀铁工艺过去都是在高温（90~100℃）下进行，自 50 年代以来，镀铁工艺有了新的突破，发展了常温镀铁、不对称交流-直流镀铁、直流电小电流密度起镀等新工艺。

1)常温镀铁

(1)常温镀铁原理。

镀铁常用的电解液由氯化亚铁、盐酸和水组成。当接通电源后，阳极的铁失去电子，成为亚铁离子溶解于溶液中，而阴极的亚铁离子获得电子，成为金属铁，沉积在阴极（工件）表面上。

(2)常温镀铁的特点及其应用

近些年以来，常温镀铁工艺在我国广泛地应用于机械零件的修复中。此工艺的优点为：镀层与基体金属结合强度高，一般为 100~160 MPa，最高可达 320 MPa；镀层硬度高，一般达 HRC 45~50，最高可达 HRC 60，耐磨性好；镀层沉积速度快，镀厚能力强，镀层厚度单边可达 2 ~4 mm，能满足磨损严重零件恢复尺寸的需要；原料来源充足，价格便宜，电流效率高达 95%，成本低；废水废气毒性小，有利于环境保护和操作人员的健康。

由于镀铁工艺有上述优点，故目前已广泛地用于修复各种轴类、内孔、导轨、平面等零件的磨损上。

(3)常温镀铁工艺

①镀前准备。包括工件去锈、除油、检验、装挂、绝缘、砂打光、测量尺寸和再次除油等工序。装挂为零件在镀槽中的装挂方式，常有：横挂镀、立挂镀和斜挂镀。横挂镀方式主要用于大型轴类零件镀铁，立挂镀的质量比横挂镀好；因受镀槽尺寸限制，多用于中小零件的镀铁；斜挂镀为综合了前两种镀的优点，但装挂比较复杂。

②镀前处理。钢铁零件与空气或其他介质长期接触，或进行热处理后，其表面上覆盖有一层黑色氧化皮，其化学成分是各种价态的铁的氧化物，如不去掉则会严重影响结合强度。清除的方法可采用盐酸腐蚀，也可采用电化学处理，如阳极刻蚀、对称交流电活化处理、换极法处理等。

③镀铁。可采用如后两种电源施镀：不对称交流一直流电镀铁法，即采用不对称交流电

起镀，然后逐步过镀到直流电镀铁。这是目前我国使用较为广泛的一种镀铁工艺。直流电镀铁法，即采用提高电解液浓度，并用小电流密度的直流电起镀，再逐步加大电流。起镀电流密度为 1-2 A/dm^2，时间约 5 min，然后经 10～15 min内过渡到正常电流密度，即 20～30 A/dm^2。

④镀后处理。将镀好铁层的零件取出后用水冲洗干净，再放入 10%的氢氧化钠溶液中浸 30 min，或在 30%的碳酸纳溶液中浸 1 小时左右进行中和，再用水洗干净。

2）槽外镀铁

大型零件可采用槽外镀铁工艺。用槽外镀铁修复大型柴油机气缸套工作表面磨损的装置，如图 1.2.3-36 所示。被镀缸套装在底座 8 上（底座内壁涂上胶以绝缘）、缸套和底座之间用胶垫绝缘并起密封作用，缸套上口和上套 3 之间既要相互接触（上套要起辅助阴极作用），又要通过胶垫起密封作用。上套压板 1 通过有孔绝缘块 2 与上套绝缘。电解液由泵 11 从切线方向送进底座，旋转上升，对缸套冲刷而有利于排氢，再经上套的溢流装置回流到电解液槽。

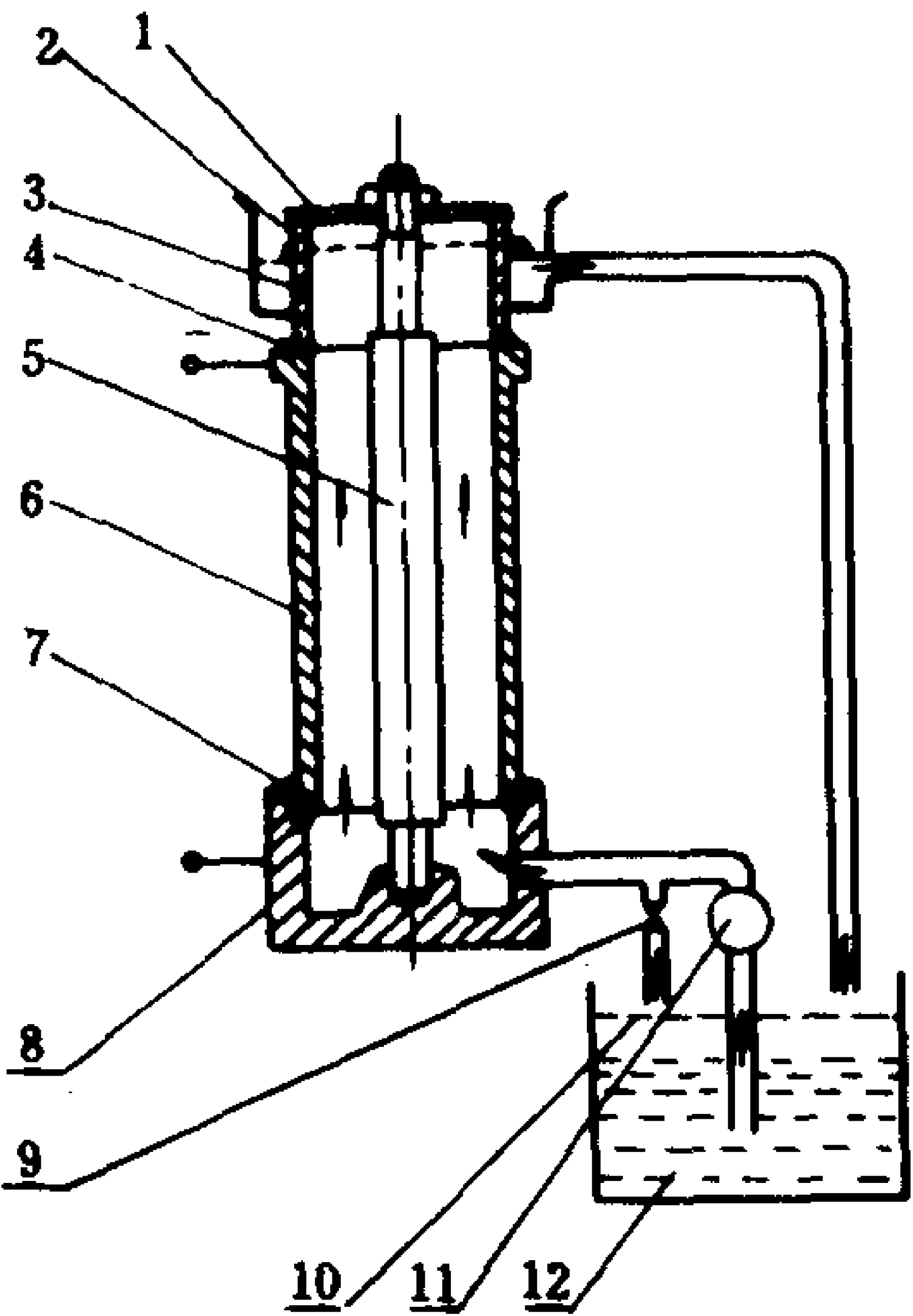


图 1.2.3-36 大型气缸套槽外镀铁装置
1-压板；2-有孔绝缘块；3-上套；4-胶垫；5-阳极；6-缸套；7-胶垫；8-底座；9-泄流阀；10-过滤布；11-泵；12-电解液槽

槽外镀的优点较多：工件绝缘简单，装卡方便迅速，缸套内电解液的温度不会升高，排氢容易，镀层表面光滑，浓差极化较小等。主要缺点是电解液与空气接触多氧化快；三价铁离子浓度升高过快，从而影响镀铁层的质量。此缺点可采用一直流电源在电解液槽内不断通电处理，以还原三价铁的方法改善。

3.4 金属扣合

金属扣合修复法，是采用高强度合金材料制成的特殊连接件，将零件的损坏处以机械的方法连接起来。此类修复方法主要用于修理大、中型铸铁零件上的裂纹、破断等缺陷。

3.4.1 强固扣合法

1）强固扣合原理

强固扣合是在垂直于工件的裂纹或折断面上，加工出具有一定形状和尺寸的波形槽，将用高强度合金材料制成的波形键镶入，并在常温下铆击波形键，使之产生塑性变形而充满波形槽腔。由于波形键的凸缘与波形槽相扣合，故能将零件损坏部分牢固地联结为一体，如图 1.2.3-37 所示。为使裂纹两端应力分散，防止其进一步扩展，应在裂纹的两端钻出止裂孔。在镶入波形键之前，在其表面上涂一层环氧树脂粘结剂，则扣合连接更为可靠。

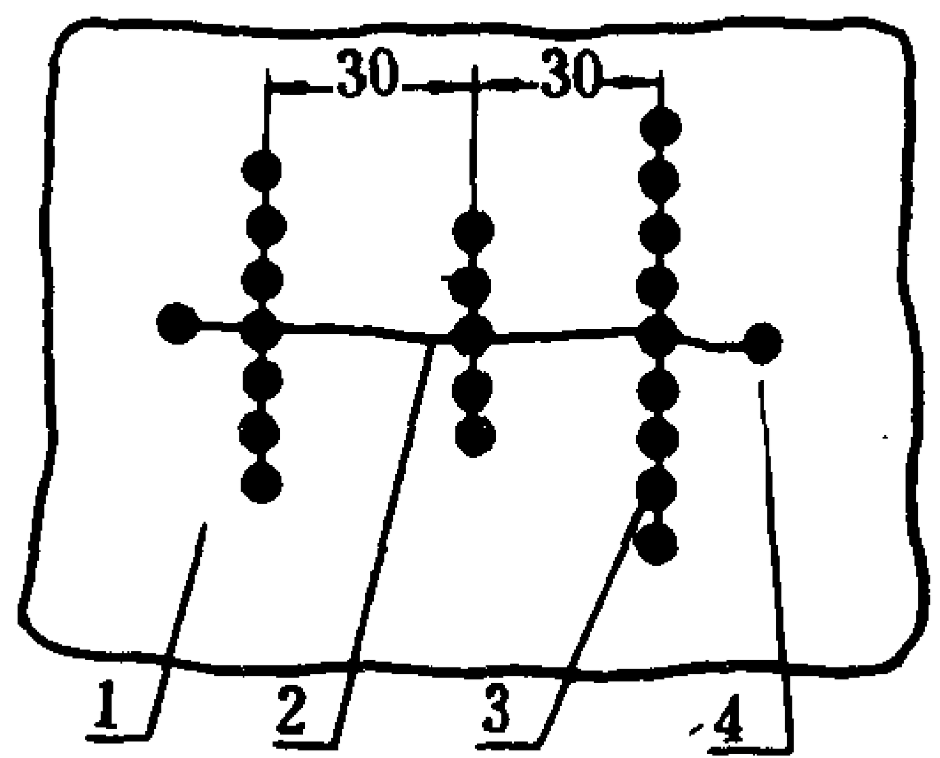


图 1.2.3-37 波形键扣合
1-零件；2-裂纹；3-波形键；4-止裂孔

2）波形键材料

一般选用低碳镍铬不锈钢，其塑性好，并有较大的冷作硬化性。经铆击后，抗拉强度有很大的提高，超过铸铁抗拉强度的几倍。修复在高温工作下的零件（如气缸盖），应选用

镍基合金（Ni 36 或 Ni 42），因其与铸铁的膨胀系数相近。

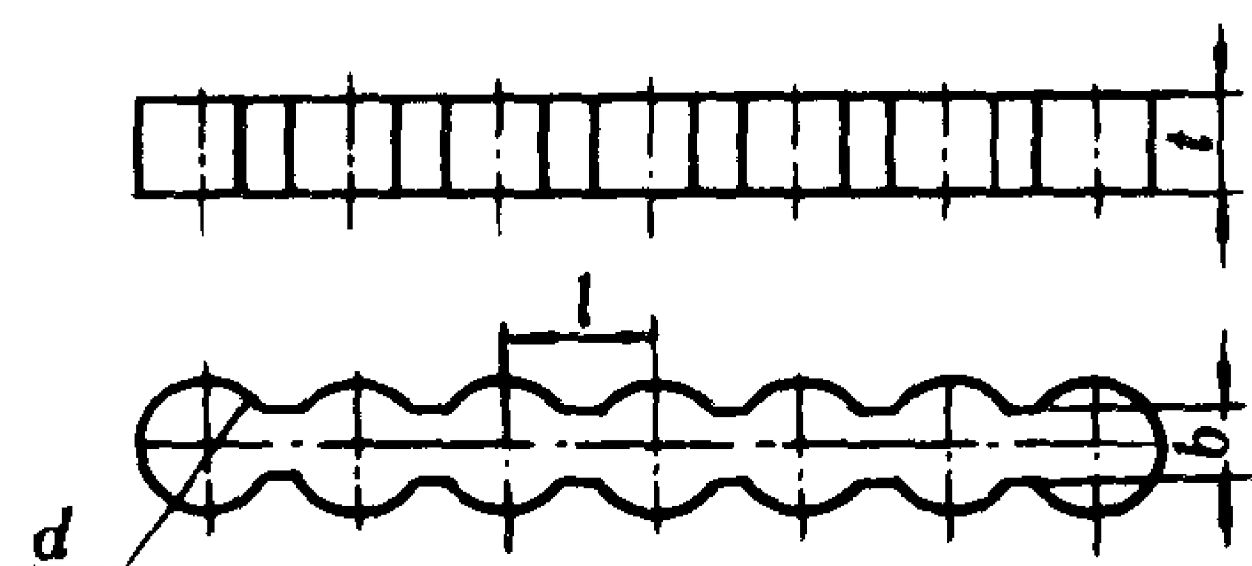


图 1.2.3-38 波形键尺寸

3）波形键的形状及尺寸

波形键尺寸包括凸缘部分d、颈部宽度b、凸缘间距l及厚度t，如图 1.2.3-38 所示。

b是基本尺寸，常取 3～6 mm。其他尺寸按下列公式求出：

$$\left.\begin{aligned} d&=(1.40\sim1.60)\ b \\ l&=(2.00\sim2.20)\ b \\ t&=(1.00\sim1.20)\ b \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.3\text{-}36)$$

波形键的凸缘，一般取 5、7 或 9 个，以 7 或 9 个为好。

4）波形槽的形状及尺寸

在损坏零件上加工成波形槽，其尺寸和形状应与波形键一致。键与槽的配合间隙为 0.10 mm。槽深 T（如图 1.2.3-39 所示）按零件的厚度H而定，一般取$T=(0.65\sim0.75)\ H$。

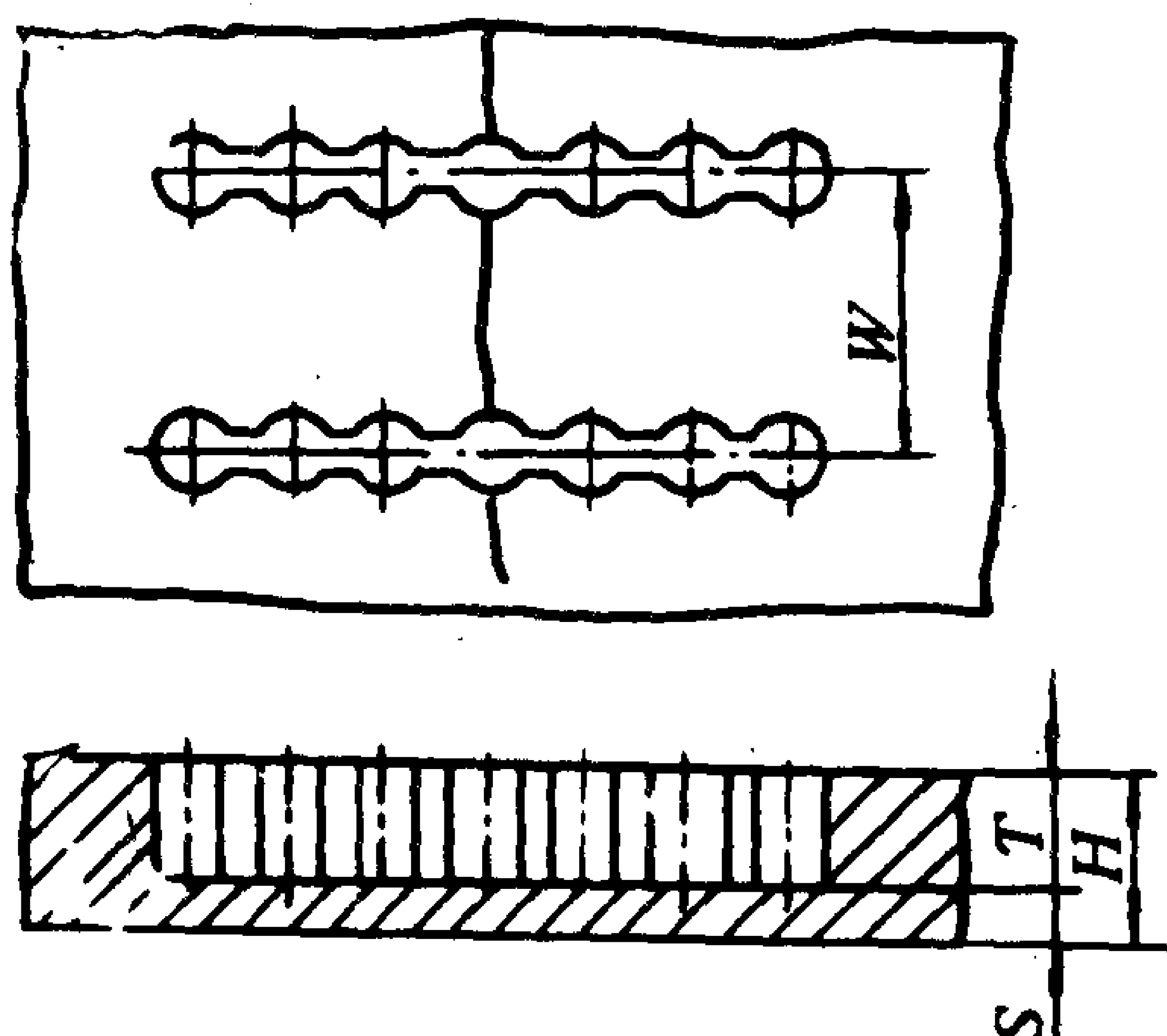


图 1.2.3-39 波形槽尺寸

3.4.2 强密扣合法

强度扣合法用于修复既有强度要求，又有密封要求的损伤零件，如气缸体、机座（油底壳）、压力容器等。为使零件达到强密扣合，应先沿裂纹或折断面按顺序钻孔再攻丝，所攻出的螺丝孔应有一定的重叠度。将涂了环氧树脂或无机粘结剂的密封螺钉拧入，如图 1.2.3-40 所示。密封螺钉的材料应选为与波形键一样，但对不重要的部位可用标准螺钉代替。螺钉直径应按两波形键之间的裂纹长度而定，通常为 6～10 mm。螺钉拧入深度与波形槽深大致相等。

3.4.3 优级扣合法

优级扣合法又称加强块扣合法，主要用于在工作中承受高载荷的厚壁零件（指壁厚超过 45 mm），固加强块可使载荷分布到更大的面积和远离裂纹或折断的部分上去。用加强块修复零件时，先在零件的缺陷处加工出矩形槽后，并镶入预先制作好的加强块，如图 1.2.3-41 所示。在结合面处钻连续孔并镶塞与加强块相同材料制成的短圆柱销 3，梢的一半圆应嵌在加强块上，另一半圆应嵌在修理零件上，以便加强块与零件牢固地结合。为进一步加强连接强度，在加强块主要受力方向上再用波形键 5 扣合。

3.4.4 热扣合法

热扣合法，是将扣合件加热后嵌入零件上预先挖好的槽中，待扣合件冷却后收缩而将零件上的裂纹或折断部分锁紧。此扣合法可用于修复大飞轮、齿轮和重型机身。按零件损坏部位的形状和扣合的可能性，热扣合件可设计成不同的式样。用工字型扣合件热扣合零件壁部的裂纹或断裂，如图 1.2.3-42 所示。

3.5 粘接

粘接，是用粘接剂把两个构件或零件破损部分牢固地粘在一起。粘接可部分地代替焊接、铆接和机械连结。目前粘接，已广泛地得到应用，其优点为：工艺简单、操作容易；修补件密封性好，还具有耐水、耐腐蚀和绝缘的性能；粘接接头的应力较均匀地分布在全部粘接面上，改善了连接处的应力集中；可连接两种不同性质的金属或连接金属与非金属材料等。其主要缺点为：粘接接头抗冲击、抗弯、抗剥离强度低；耐老化性能差；有机粘接剂一般不能耐高温；目前还缺乏检验粘接质量的有效方法等。

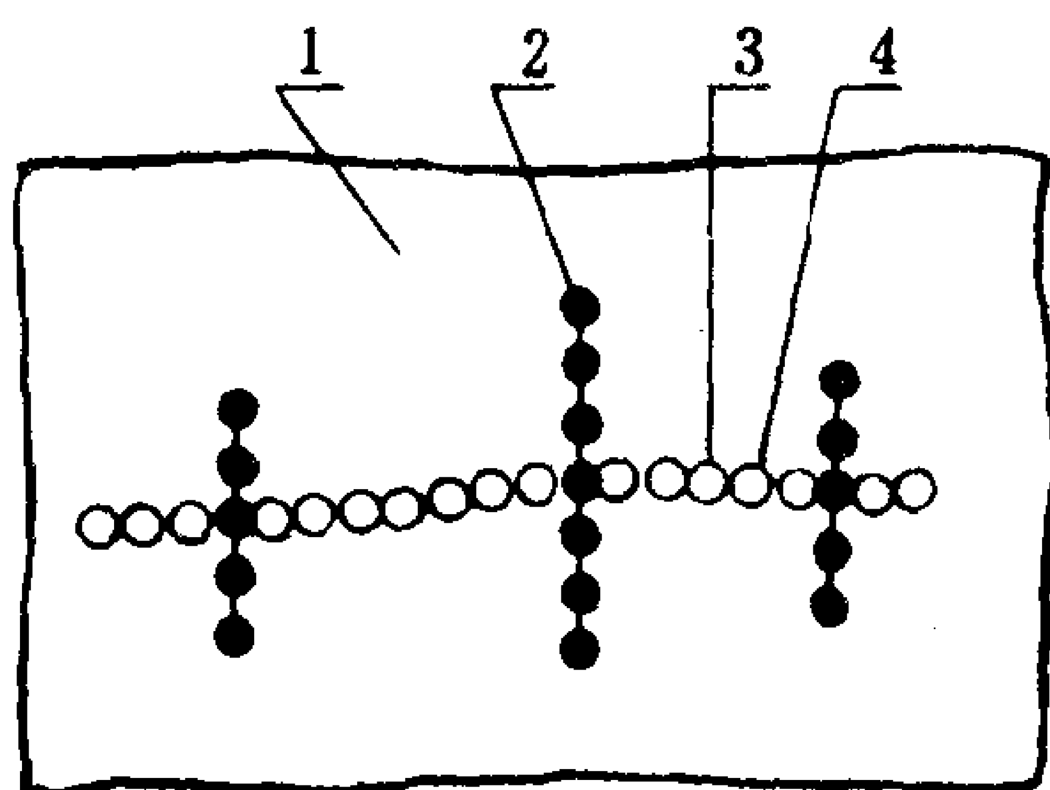


图 1.2.3-40 强密扣合

1-零件；2-波形键；3-密封螺钉；4-裂纹原位置

3.5.1 粘接基本原理

关于粘结原理的几种理论：

（1）机械联结理论。认为被粘接的物体表面是粗糙的、多孔的，胶液渗入到孔隙中后，形成无数微小的“销钉”，而将两个物体连接起来。

（2）物理吸附理论。认为物质分子之间存在着物理吸附作用，粘接剂使物质的分子紧密而充分地接触，而造成很大的物理吸附力将两个物体连接起来。

（3）扩散理论。认为粘接剂分子与物体表面分子都处于运动之中，一方面的分子通过扩散作用可扩散到另一方的表面中去，而使粘接剂与物体牢固地连接在一起。

（4）化学键理论。认为粘接剂与被粘物体表面之间发生化学作用，形成了化学键，就象铁链一样，把两个物体紧密地有机联系起来。

（5）应将粘接作用视为上述几种作用综合作用的结果。

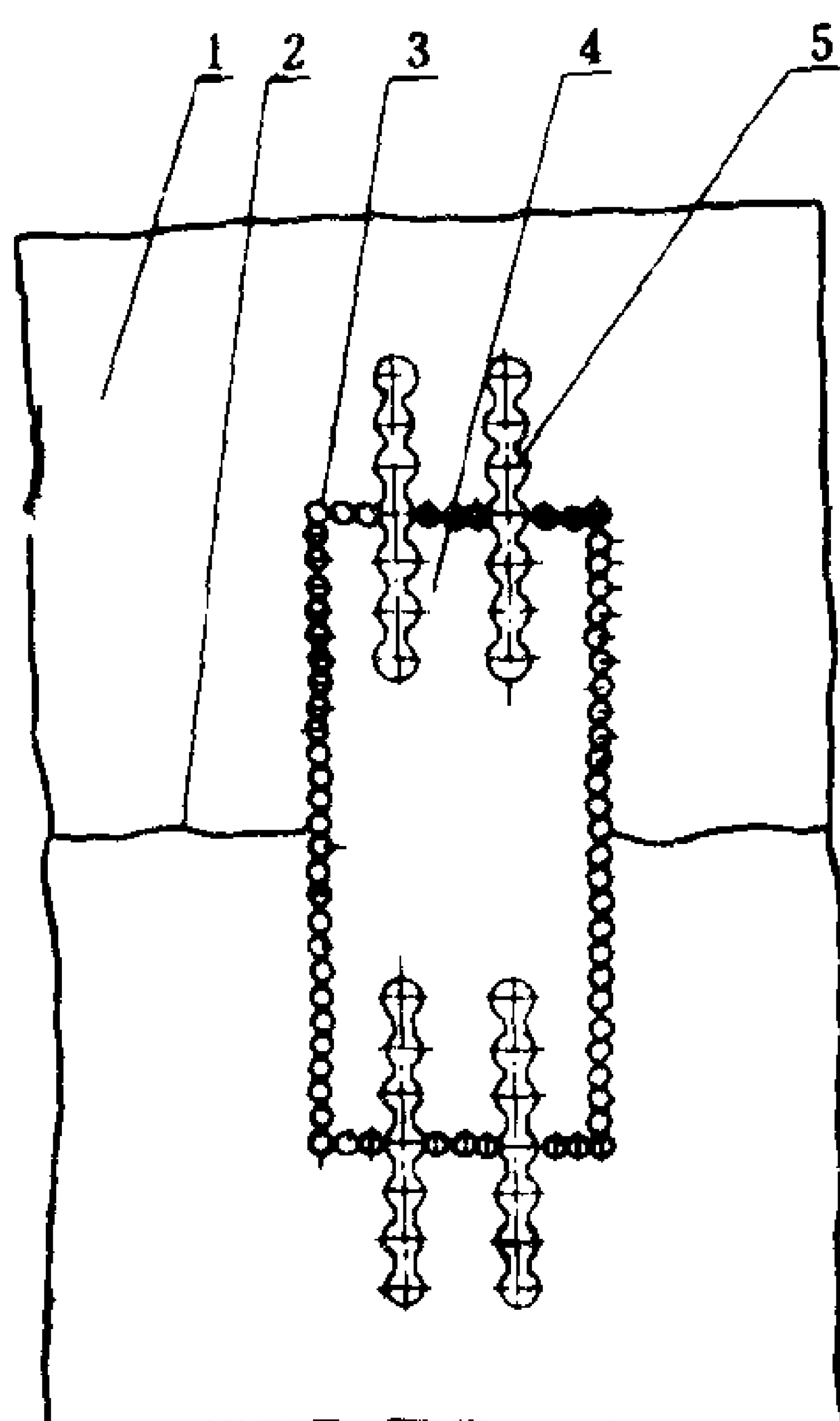


图 1.2.3-41 加强块扣合

1-零件；2-裂纹；3-短圆柱销；4-加强块；5-波形键

3.5.2 粘接剂的分类

1）按基本组成分类法

（1）热固性粘接剂。有酚醛树脂、三聚氰胺树脂、环氧树脂、不饱和树脂等。这类粘接剂一般是在加热，或在触媒、或在硬化剂作用下，树脂才能发生聚合和固化。这类粘接剂的特点为：耐热性好，粘接力大，有较高的弹性系数，耐老化、耐腐蚀性好；缺点是多数韧性差，耐冲击性不好。

（2）橡胶系粘接剂。有天然橡胶、丁苯橡胶、异丁胶、丁基橡胶、聚硫橡胶等。一般可在室温下起粘接作用。其优点为：初始粘接力大，可以自由改性，并可在室温下加硫硫化，也可加热硫化，韧性好，耐疲劳强度高；其缺点为耐化学溶剂性不好。

（3）复合型粘接剂。是上述两类粘接剂的混合剂，有尿素树脂与醋酸乙稀、聚乙烯醇、酚醛树脂与醋酸乙烯、环氧树脂与尼龙、丁睛橡胶等。这些复合粘接剂具有耐高温、高强度、性能好等特点，用途广泛。

2）按性能分类法

（1）结构胶。具有较高的强度，粘接后能承受较大的负荷。用于粘接受力较大的构件。

（2）非结构胶。用于一般不承受大载荷的构件粘接，或作定位粘接。

（3）特种胶。为满足某些特殊要求的粘接胶，如导电胶、光敏胶等。

3)按工艺分类法

粘接剂按其工艺，可分为溶剂型、热熔型、固化型和压敏型。

4)按化学成分分类法

（1）有机粘接剂。由粘料、固化剂、增塑剂、稀释剂、填料和促进剂组成。这6种成分中，前2种是不可少的，后4种可按需要添加。①粘料，是粘接剂的基本成分，对粘接剂的性能起主导作用。粘料包括合成树脂或合成橡胶，以及两者的混合体。以环氧树脂应用最广。目前环氧树脂多指双酚基丙烷环氧树脂，由环氧氯丙烷与双酚基丙烷在苛性纳溶液中缩合而成。②固化剂，是粘接剂的主要成分。环氧树脂加入一定数量的固化剂后，在一定温度和时间条件下，就能固化为固体。固化剂的用量对粘接剂的机械性能影响很大，故必须严格控制其用量。

图1.2.3-42 工字型热扣合件

1-零件；2-裂纹；3-扣合件

（2）无机粘接剂。无机粘接剂的种类很多，主要以硅酸盐、磷酸盐等为粘料的水泥状物质，它具有较高的粘附性能和耐热性能。在机械修复中，常用的无机粘接剂多是以磷酸、氢氧化铝、氧化铜为原料，并按一定比例调制而成的。氧化铜一磷酸无机粘接剂由两组分所组成，其中一组分为氧化铜，另一组分为磷酸与氢氧化铝配制的磷酸溶液。

无机粘接剂有如下特点：①比一般粘接剂耐热性好，可用于工作在600～900℃高温下工作构件的连接，如用于修复内燃机气缸盖的排气阀孔附近的裂纹；②粘接剂组成简单，调制方便；③粘接工艺简单，经济性好；④脆性大，耐冲击性差。

3.5.3 粘接工艺

1)初步清洗。用汽油或煤油清洗粘接零件以除油，并除去积炭、铁锈等。

2)确定粘接方案。根据零件损坏程度及其工作条件，确定最佳的粘接方案，包括合理选用粘接剂、确定粘接方法及接头形式、表面处理等。

3)粘接面和接头的机械加工。一般的粘接接头和粘接面，都必须进行表面粗糙处理；对于裂纹部位要开坡口及钻止裂孔。有的接头还要进行加强，制作加固件。

4)粘接表面处理。连接面在粘接前处理好坏是决定粘接质量的重要因素。对于金属表面处理方法一般为：清洗，除油和机械处理(砂布打磨、粗车粗刨、喷砂、电拉毛等)，化学处理（形成均匀的新氧化膜，以提高粘附力)。

5)涂胶。涂胶前先进行调胶。

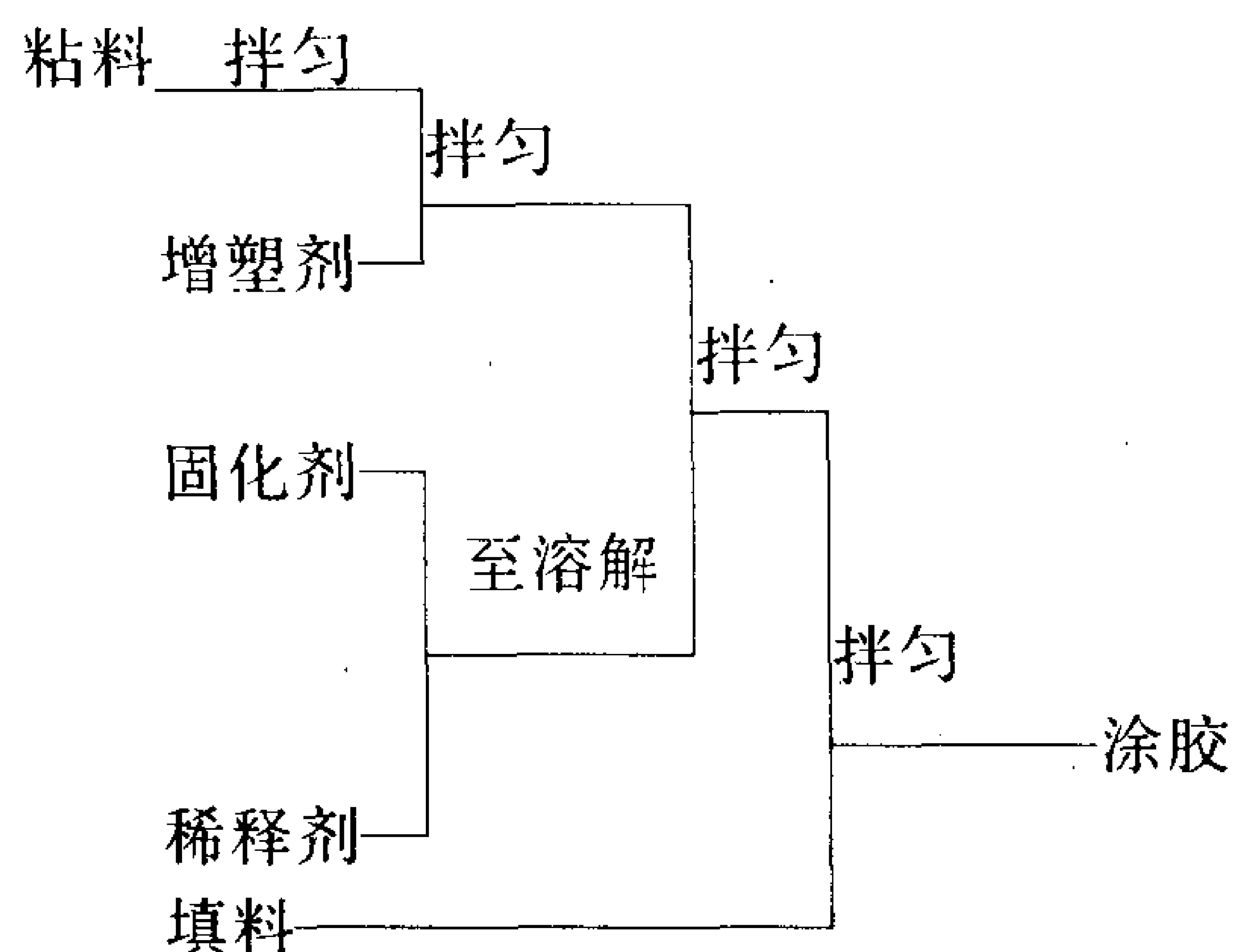
（1）市场出售的溶液型粘接剂、分装的粘结剂及固体型粘接剂，按技术条件或产品使用说明书调制；

（2）自行配制的粘接剂，可采用不同类型的固化剂，其操作顺序则不同。

用胺类作为固化剂的粘接剂的调制顺序如下：

粘料、增塑剂 → 拌匀；+ 填料 → 拌匀；+ 固化剂（缓慢加入）→ 拌匀 → 涂胶

用酸酐类等作为固化剂的粘接剂调制顺序如下：



调好胶后，可采用涂抹、刷涂或喷涂方法，将涂胶均匀地涂在连接面上。一般情况下，涂胶后应立即胶合。胶合后处于半固化状态时如发现接头有位移，应拆开对粘合面重新处理后，再涂胶粘接。

6）固化。固化是粘接质量好坏的重要环节。固化应在一定的压力、温度及时间条件下进行。加压有利于胶的完全浸润和气泡从胶层中逸出。热固型的粘接剂必须在一定的温度下才能发生化学反应而固化。提高固化时的温度，可使固化速度加快、缩短固化时间；但温度过高使固化速度过快而影响浸润，并使粘接接头产生很大的内应力，严重时会把粘接剂烤焦、胶层变质。常温固化一般为 24 h 左右，加热固化一般为 1 ～3 h。

7）质量检验。粘接质量检验包括：观察胶层有无翘起和剥离迹象；用苯、丙酮等溶剂滴在胶层表面上浸 1 ～ 2 分钟，如无溶解粘手现象则表明完全固化；对于密封零件的接头应检验是否渗漏。由于粘接技术质量检验方式目前还不成熟，故对粘接接头还不能进行非破坏性的定量检测。

3.5.4 粘接在修理中的应用

1）气缸体水腔外壁裂纹的粘补

将缸体上的裂纹部位用汽油刷洗，或用火焰喷烧，再用手砂轮打磨，使其露出金属光泽。沿裂纹开一道浅槽，并在裂纹末端钻直径为 3～5 mm 的止裂孔，用竹片蘸胶堵塞止裂孔。按裂纹轮廓涂上一层粘胶剂，再敷上玻璃纤维布 2～3 层。粘接剂可选用牌号 211、J-11、KH-223、E-2 等，还可用环氧树脂、聚酰胺自行配制。

2）气缸盖气阀座之间裂纹的复合粘补

气缸盖进排气阀座孔之间产生的裂纹，如采用焊修，易引起缸盖变形或出现新的裂纹；采用无机粘接剂及机械加强进行复合修理，效果良好。先在裂纹垂直方向开一条截面为 6 × 6 mm、长 26 mm 的槽，在槽的两端钻孔和攻丝（M 6），埋入两节螺丝码（如图1.2.3-43所示），用气焊将两节螺丝码的焊口焊好，以形成一个完整的金属加强码，如图1.2.3-43所示的 B-B 剖面。沿缸盖平面裂纹方向钻一个直径为 2.5 mm 的横向斜孔，如图中 A-A 剖面所示。在裂纹两端再钻垂直孔，其深度根据裂纹深度而定，然后根据横向斜孔及两个垂直孔的深度，分别加工直径为 2.5 mm 的销钉。调制无机粘接剂，把销钉浸入无机粘接剂内，取出将其压入孔内，最后用无机粘接剂将槽、孔填充平。固化可在室温下放置 48 h 左右即可；急用时可在室温下放置 1 ～2 h 后，用红外线灯加热至 60～80℃，保温 3 h即可使用。

3.6 电泳

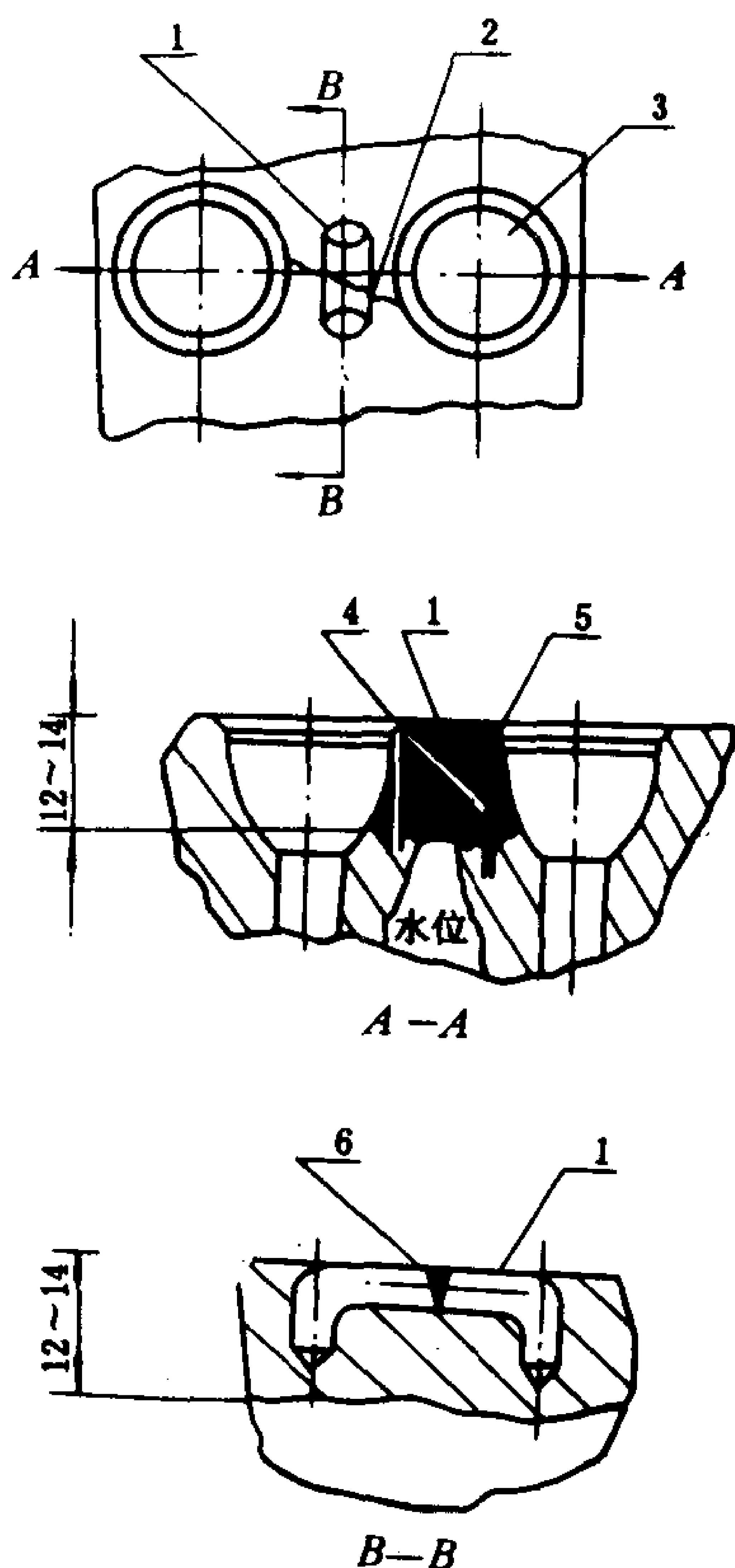


图1.2.3-43 气缸盖气阀座孔之间裂纹的粘补

1-螺丝码；2-裂纹；3-气阀座内腔；4-横向斜孔；5-垂直孔；6-焊口

电泳成膜，是将二硫化钼混入水溶性环氧树脂漆中，利用电解作用，使树脂和二硫化钼沉积在零件表面上，形成一层薄膜。然后在烘箱内加热固化。此一层薄膜，不仅可作为防腐蚀的保护层，而且由于二硫化钼是优良的固体润滑剂，加在环氧树脂薄膜腔中，有减小摩擦、提高耐磨性的作用。用电泳法可修复磨损零件，目前主要用于修复内燃机活塞。

电泳成膜过程与电镀过程基本相似，但在理论上比电镀要复杂得多。因电泳成膜过程中，不单是离子起作用，还有填充料、树脂及助溶剂，变化非常复杂。电泳成膜时，与电镀不同之处是将工件作为阳极。

参考文献

[1] D.F.Moore, 黄文治等译：摩擦学原理和应用，机械工业出版社，1982年8月

[2] F.P.Bowden and D. Tabor: The friction and Lubrication of Solids, PtII. Oxford University Press, 1964

[3] J.A. Greenwood and J.B.P. Williamson: Contact of nominally flat surfaces, Proc, R. Soc., A, 1966

[4] 日本机械学会编：机械技术手册，机械工业出版社，1984年11月

[5] 机械工程手册 / 电机工程手册 编辑委员会：机械工程手册第22篇摩擦、磨损与润滑，机械工业出版社，1982年10月

[6] И.В. КРАГЕЛЬСКИЙ, 汪一麟等译：摩擦磨损计算原理，机械工业出版社，1982年10月

[7] J. T. Burwell: Survey of possible wear mechanisms. Wear, 1, 1957

[8] J. F. Archard: Contact and rubbing of flat surfaces, J. appl. Phys., 24, 1953

[9] T. S. Eyre: Wear characterics of metals, Tribolody International, 1976

[10] 戴宏杰等编：摩擦学基础，上海科学技术出版社，1984年9月

[11] A. A. Griffith: The phenomena of rupture and flow in solids, Phil, Trans, Roy, Soc of London A221 (1921)

[12] E. Orowan: Energy criteria of fracture, Wellding Journal, 34, 1955

[13] 蔡泽高等编著：金属磨损与断裂，上海交通大学出版社，1985年6月

[14] 金属机械性能编写组：金属机械性能，机械工业出版社，1982年10月

[15] J. R. Rice: Apath independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and crancks, J. Appl, Mech, 1968

[16] 张庆荣等编：工程机械修理学（上册）人民交通出版社，1979年

[17] 机修手册第二篇设备零件的修复和加工工艺、机械工业出版社，1979 年

[18] 武汉水运工程学院船机工艺教研室编：船舶机械制造与修理工艺学（下册），人民交通出版社，1987 年 6 月

[19] 爱·凯利：维修策略的现在与将来，国际设备工程会议学术论文选集，1979 年．

第 4 章　船舶原理和结构

1　船的形状和尺寸

1.1　型线图

表示船体几何形状和尺寸的图称为“型线图”。它是船舶设计、计算和建造放样的重要依据。它由平行于三个基准面(中线面、中站面、基平面)，等间距截取若干个剖面，并把这些剖面各自投影到相应的基准面上所组成，如图 1.2.4-1 所示。

图 1.2.4-1　远洋货船“风光”号型线图

1.1.1　纵剖线图

平行于中线面的平面即纵剖面和船体表面的交线称为纵剖线。把所有纵剖线投影在中线面上构成纵剖线图。

1.1.2　横剖线图

一般将首尾垂线之间的船长分成 20 等分，得到 21 个平行于中站面的横剖面，由尾至首编号 0、1、2……20，第 10 号横剖面为中站面，横剖面和船体表面的交线称为横剖线，投影在中站面上构成横剖线图。横剖线只画出一半，尾部的画在左半，首部的画在右半。

1.1.3　半宽水线图

平行于基平面的平面和船体表面相交的线称为水线，把所有水线投影在基平面上构成半宽水线图，每一水线只画出半边。水线面自龙骨基线向上依次编号 0、1、2……。

型线图中还画出甲板线，即上甲板和船体表面的交线。

一般型线图除木船表示船体外型外，是指壳板内表面。这种船体表面称为“型表面”，从型表面上量下来的尺度称为“型尺度”。

在型线图中一般都应给出型值表，见表 1.2.4-1，用于性能计算和建造放样，以免从图纸上量取数据。

表 1.2.4-1

"风光"号型值表

站号	半宽														高度							
	基线	1200水线	2400水线	3600水线	4800水线	6000水线	7200水线	8400水线	9600水线	10800水线	上甲板	舷墙	首楼	首楼舷墙	1200纵剖线	3600纵剖线	6000纵剖线	8400纵剖线	上甲板	舷墙	首楼	首楼舷墙
0							496	2305	3930	4983	6592	6939			7555	9226	12525		13880	14980		
1	275	573	801	954	1097	1583	3320	4865	6386	7238	8432	8707			5291	7370	9186	13490	13586	14686		
2	471	1434	2054	2553	3210	4238	5804	6974	8098	8708	9495	9690			865	5343	7350	10142	13325	14425		
3	680	2691	3724	4638	5632	6745	7844	8568	9261	9627	10040	10160			208	2242	5281	7940	13103	14203		
4		4449	5804	6860	7743	8517	9150	9559	9905	10070	10200	10200			13	680	2606	5804	12919	14019		
5		6412	7691	8477	9063	9496	9825	10011	10152	10196	10200	10200			2	136	942	3463	12766	13866		
6		8188	9101	9555	9830	10016	10133	10183	10200	10200	10200	10200			2	29	226	1398	12640	13740		
7		9378	9892	10088	10175	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200			2	28	54	461	12540	13640		
8		9809	10171	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200			2	28	54	169	12462	13562		
9		9958	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200			2	28	54	99	12407	13507		
10		9958	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200			2	28	54	99	12400	13500		
11		9877	10190	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200			2	28	54	114	12452	13552		
12		9610	10066	10179	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200	10200			2	28	54	263	12451	13645		
13		9148	9722	9958	10075	10135	10182	10200	10200	10200		10200			2	28	54	552	12671	13772		
14		8384	9049	9418	9669	9847	9967	10040	10106	10148	10200	10200			2	28	79	12222	12837	13935		
15		7239	7976	8429	8775	9005	9267	9416	9600	9731	9959	10061			2	28	340	3510	13054	14154		
16		5634	6438	6930	7296	7582	7823	8015	8281	8533	9169				2	179	1640	10181	13342	14454		
17		3764	4520	4984	5333	5598	5859	6083	6441	6821	8027		8999		20	1020	7840	14445	13687		16005	
18		2000	2650	3040	3320	3540	3730	3960	4350	4920	6560		8140		530	6250	12800		13900		16240	16330
19		950	1520	1920	2140	2220	1950	1850	2290	2810	4850		6570	7480	1650	12200	15850		14250		16600	17720
20		130	720	1230	1480	1408	840	390	420	570	2570		4220	5340	3450	16250			14780		17130	18220

1.2 主尺度

船舶的主尺度指船长、型宽、型深和吃水。其定义及符号如表 1.2.4-2。

表 1.2.4-2 主 尺 度

名 称	符 号	意 义
船长	L	设计水线处首尾垂线间长
型宽	B	设计水线处的最大宽度
型深	D	在中站面处由基线至上甲板边线的距离
吃水	d	在中站面处由设计水线至基线的距离

1.3 主尺度比和船型系数

1.3.1 主尺度比

为了研究船舶的各种性能，常用主尺度比来粗略地表示船体形状的特征，见表 1.2.4-3。

表 1.2.4-3 主 尺 度 比

定 义	符 号	意 义
长宽比	L/B	与快速性有关
宽吃水比	B/d	与稳性、摇摆性、快速性和操纵性有关
深吃水比	D/d	与稳性、抗沉性和船体强度有关
宽深比	B/D	与稳性和船体强度有关
长深比	L/D	与稳性和船体强度有关

1.3.2 船型系数

船型系数也是粗略地表示船体形状的特征数，见表 1.2.4-4。

表 1.2.4-4 船 型 系 数

名 称	符号与定义	意 义	示意图
水线面系数	$C_w = A_w/LB$	表示水线面形状的肥瘦程度	
中横剖面系数	$C_m = A_m/Bd$	表示中横剖面的肥瘦程度	
方形系数	$C_b = V/LBd$	表示水下船体形状的肥瘦程度	
棱形系数	$C_p = V/LA_m$	表示水下船体形状沿纵向分布的情况	
垂向棱形系数	$C_{vp} = V/dA_w$	表示水下船体形状沿垂向分布的情况	

船型系数一般是对设计水线而言，对其它水线则应根据对应吃水下的A_m、A_w和V值代入，求出其系数。因此，可据此画出各系数和吃水的关系曲线，如图 1.2.4-8 所示。表 1.2.4-5 是各类船舶主尺度比和船型系数的大致范围。

表 1.2.4-5　主尺度比和船型系数

船舶类型	主尺度比			船型系数		
	L/B	B/d	D/d	C_w	C_m	C_b
民用船舶						
远洋客船	8～10	2.4～2.8	1.6～1.8	0.75～0.82	0.95～0.96	0.57～0.71
沿海客货船	6～7.5	2.7～3.8	1.5～2.0	0.7～0.8	0.85～0.96	0.5～0.68
远洋货船	6～8	2.0～2.4	1.1～1.5	0.8～0.85	0.95～0.98	0.7～0.78
拖船	3～6.5	2.0～2.7	1.2～1.6	0.72～0.8	0.79～0.9	0.46～0.6
渔船	5～6	2.0～2.4	1.1～1.3	0.76～0.81	0.77～0.83	0.5～0.62
油船	4.8～7.5	2.1～3.4	1.1～1.5	0.73～0.87	0.98～0.99	0.63～0.83
军舰						
巡洋舰	8～11	2.8～3.3	1.7～2.0	0.69～0.72	0.76～0.89	0.45～0.65
驱逐舰	9～12	2.8～4.5	1.7～2.0	0.7～0.78	0.76～0.86	0.4～0.54
炮艇	6.5～9	2.8～3.3	1.65～2.8	0.7～0.8	0.8～0.9	0.52～0.64
鱼雷快艇	5～6.5	2.5～4.5	—	—	—	0.3～0.4
潜水艇	8～13	1.4～2.0	—	—	—	0.4～0.55
猎潜艇	7.9～8.5	2.6～3.0	1.6～2.0	0.74～0.78	0.75～0.82	0.45～0.5

2　船舶静水力曲线

静水力曲线图综合了船舶在正浮状态下任何吃水时的浮性和初稳性资料，据此可以探讨船舶在各种装载情况下是否具有足够的稳性和合理的浮态。静水力曲线图是由设计部门绘制出，供船员使用。

2.1　船舶所受的力

船舶在各种载重情况下，保持一定浮态的性能称为浮性。漂浮不动的船舶所受的力有下述两种。

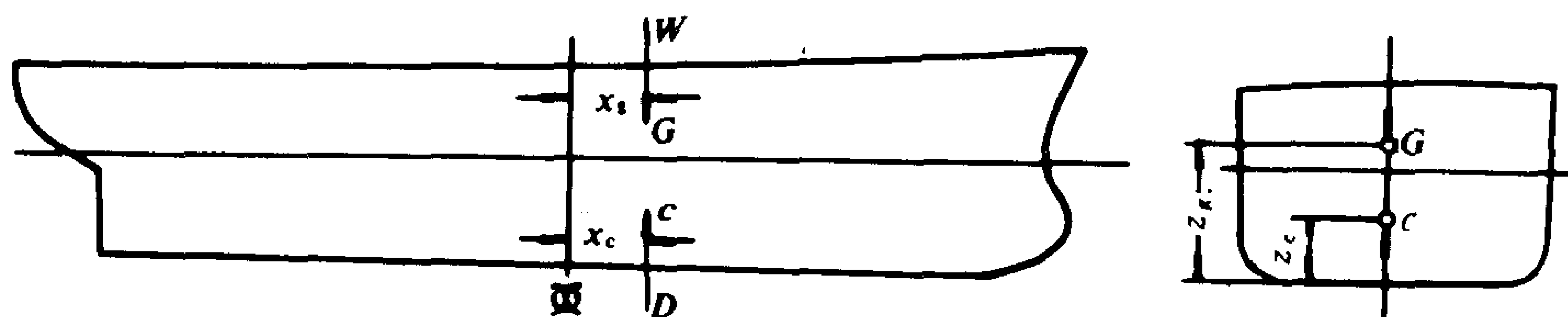


图 1.2.4-2　船舶所受的力

2.1.1　重力

船体及装载于船上的物体所受的重力，其合力即船舶的重力$\overline{W}$，作用于重心G，方向垂直向下，如图 1.2.4-2 所示。

2.1.2　浮力

作用于船体水下部分的静水压力，其合力即船舶的浮力D，等于排开水的重量，即$D=rV$，作用于浮心C，方向垂直向上。

只要船舶重力与浮力相等，重心与浮心同在一铅垂线上，船舶即处于平衡状态。如浮力大于重力，船舶则上浮；如浮力小于重力，船舶则下沉。如果重心和浮心在船舶中线面不处

于同一垂线上，船舶将产生纵倾，直到G、C两点处于同一垂线上为止。如果重心和浮心在船舶横剖面不处于同一垂线上，船舶将产生横倾，直到G、C两点处于同一垂线上为止。若以坐标值（x_g，y_g，z_g）表示重心的位置，（x_c，y_c，z_c）表示浮心的位置，则船在正浮状态下的平衡条件是：

$$\left.\begin{aligned}\overline{W}&=D=\gamma V\\ x_g&=x_c\\ y_g&=y_c=0\end{aligned}\right\} \tag{1.2.4-1}$$

由此可知，在研究船舶的浮性问题时，最关键的是重量、重心和排水量、浮心之间的关系问题。重量、重心可根据总布置图和其他有关图纸及技术资料进行计算，而排水量和浮心则需依据型线图和型值表进行分析计算，后者应由设计部门制出曲线供船员使用。

2.2 船舶的重量和重心位置的计算

船的总重量是船上各个组成部分重量（P_1、P_2……P_n）的总和。船的重心位置（x_g，y_g，z_g）可按下式求得：

$$\left.\begin{aligned}x_g&=\frac{\sum p_i x_i}{\sum p_i}\\ y_g&=\frac{\sum p_i y_i}{\sum p_i}\\ z_g&=\frac{\sum p_i z_i}{\sum p_i}\end{aligned}\right\} \tag{1.2.4-2}$$

式中，x_i，y_i，z_i为各部分重量p_i的重心位置。

重心的高度影响船的稳性和摇摆，它的左右前后位置影响船的浮态。在建造和使用过程中，总是设法使重心位于中线面上，即使$y_g=0$。故只要计算x_g和z_g。如要卸去某项重量，p_i取负号，x_i在船中前取正号，在船中后取负号。如有载荷移动，则可按在一处卸去载荷，在另一处增加此载荷处理。

2.3 排水量曲线

当船处于平衡浮态时，排水量是空船重量与载重量之和。随装载情况不同，商船分满载排水量和空载排水量。前者指货物和旅客全部装载满额，后者指完全没有货物和旅客。排水量曲线一般包括三根曲线，如图 1.2.4-3 a）所示。

2.3.1 型排水体积V曲线

V根据型线图计算而得。没有包括船壳板及附体。

2.3.2 总排水体积V_k曲线

包括壳板及附体的排水体积，其数值可根据下式估算。

$$V_k=kV \tag{1.2.4-3}$$

通常$k\approx1.004\sim1.03$，万吨级货船的$k\approx1.006$。

2.3.3 排水量D曲线

$$D=\gamma V_k \tag{1.2.4-4}$$

有了排水量曲线，就可根据吃水d求得排水量D，反之亦可。

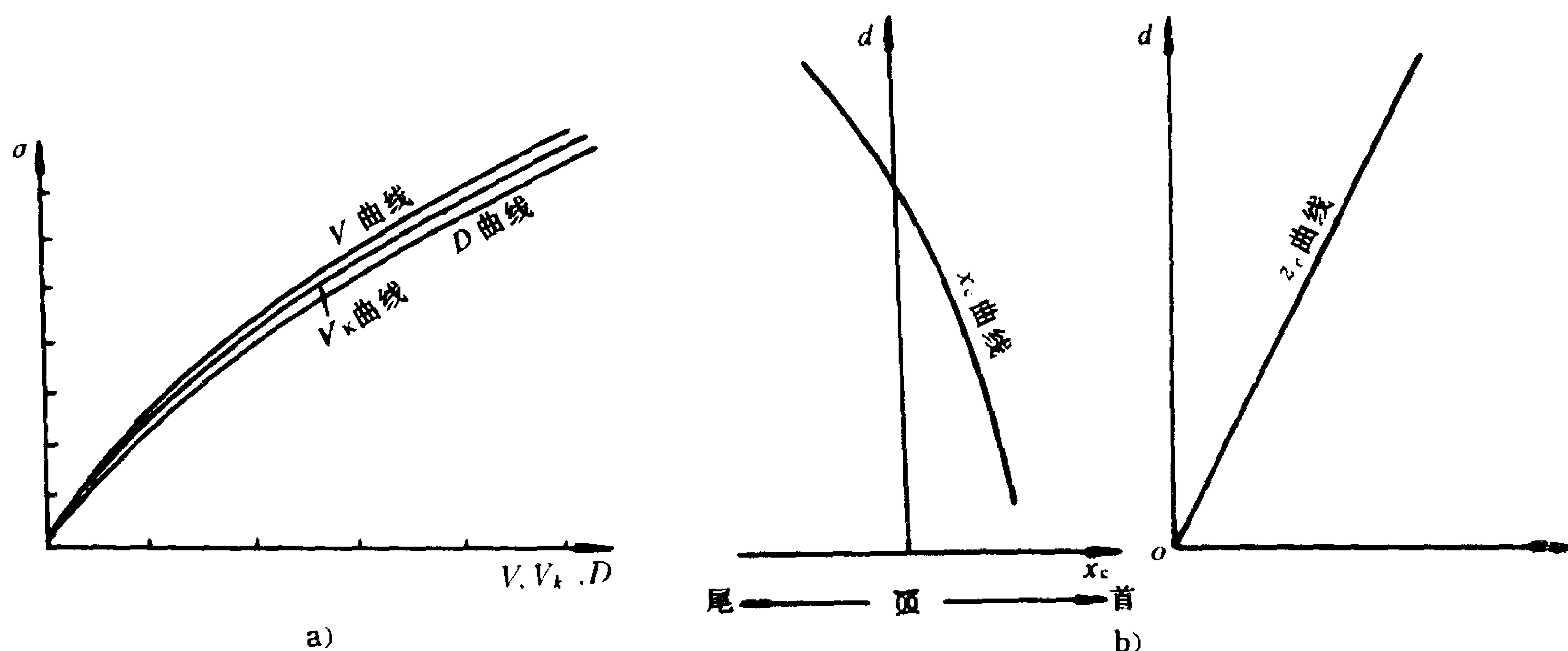


图 1.2.4-3 排水量浮心坐标曲线

a)排水量曲线；b)浮心坐标曲线

2.4 浮心坐标曲线

是指浮心纵向坐标x_c和垂向坐标z_c随吃水而变化的曲线，如图 1.2.4-3 b)所示。

2.5 每厘米吃水吨数曲线

船舶吃水增加（或减小）1厘米时，引起排水量增加（或减小）的吨数称为每厘米吃水吨数，用TPC表示。可根据下式算出：

$$TPC=\frac{\gamma A_w}{100} \qquad (1.2.4\text{-}5\text{ a})$$

TPC只与A_w有关，因此，每厘米吃水吨数曲线的形状与水线面面积曲线完全相似。如已知船舶在吃水d时的TPC值，便可求出装载小量货物(不超过排水量的 10%)p吨以后的平均吃水增量Δd，即：

$$\Delta d=\frac{p}{TPC} \qquad (1.2.4\text{-}5\text{ b})$$

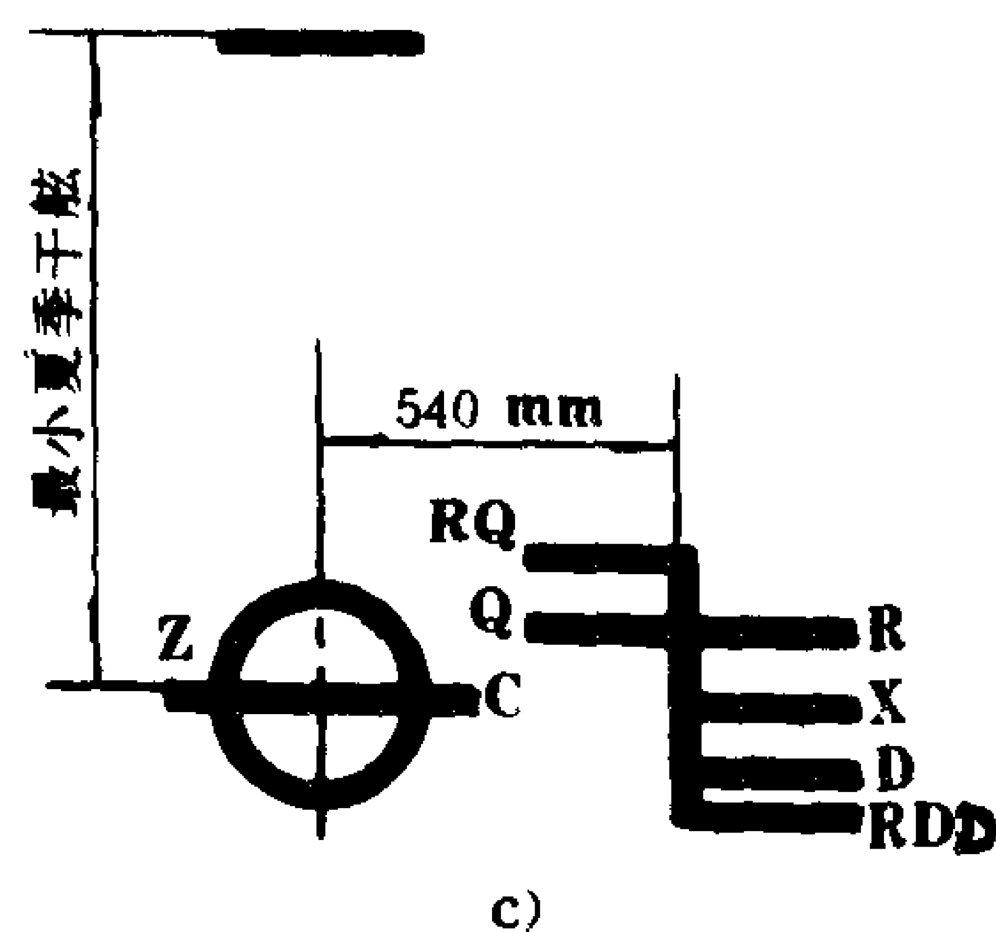


图 1.2.4-3 c) 载重线标志

Z、C-代表中华人民共和国船舶检验局；X-夏季载重线；D-冬季载重线；BDD-冬季北大西洋载重线；R-热带载重线；Q-夏季淡水载重线；RQ-热带淡水载重线

2.6 储备浮力和载重线标志

2.6.1 储备浮力

是指满载水线以上船体水密部分的容积。它对稳性、抗沉性等有很大影响，是保障航行安全的一个重要指标。通常以满载排水量的百分比来表示，其大小依船舶类型、航区及运货种类而定。河船约为 10%～15%；海船约为 20%～50%，军舰在 100%以上。

2.6.2 载重线标志

为保证船舶安全航行，船舶检验局规定在船中两舷刻出载重标志，表明该船在不同季节、不同航区航行时所允许的最大吃水线，如图 1.2.4-3 c) 所示。

2.7 船舶稳性

船舶受外力作用失去平衡，当外力消失后又能重新恢复平衡状态的性能称为船舶稳性。通常分为初稳性和大倾角稳性。

2.7.1 稳心和稳心半径

船舶在横向平面或纵向平面上连续进行等容倾斜时，浮心C由于水下体积形状变化而沿一定轨迹移动。轨迹在倾斜面上的投影叫浮心C曲线，如图 1.2.4-4 a) 中的CC_1曲线。浮心C曲线的曲率中心M，称为横稳心或初稳心。曲率中心半径CM称为横稳心半径或初稳心半径，通常以r表示。当θ为小角度时，r可用下式表示：

$$r=\frac{I_x}{V} \quad (1.2.4\text{-}6)$$

船舶在等容纵倾时，情况完全类似，如图 1.2.4-4 b)所示。M_z称为纵稳心，CM_z为纵稳心半径，以R表示。则有：

$$R=\frac{I_{gf}}{V} \quad (1.2.4\text{-}7)$$

r及R曲线由设计部门提供，附在静水力曲线图中，供船员使用。

2.7.2 初稳心公式、稳心高度

1)初稳心公式

船舶横倾一小角度θ时如图 1.2.4-5 a)所示，重力W的作用点G和浮力D的作用点C_1不在同一铅垂线上，因而产生了一个回复力矩M_h即

$$M_h=Dh\sin\theta \quad (1.2.4\text{-}8)$$

此即为初稳心公式。

从稳心M和重心G的相互位置可以判断船舶平衡的稳定性能。

(1) G在M之下，M_h的方向与横倾方向相反，则船舶能回复至原来的平衡状态，称为稳定平衡，如图 1.2.4-5 a) 所示。此时h和M_h都为正值。

(2) G在M之上，M_h的方向与横倾方向相同，则船舶将继续倾侧，称为不稳定平衡，如图 1.2.4-5 b) 所示。此时，h和M_h都为负值。

(3) G和M重合，$h=0$，$M_h=0$，船舶可平衡于任意位置，称为随遇平衡，如图 1.2.4-5 c) 所示。

从初稳心公式可知：在排水量一定时，横稳心高h越大，回复力矩M_h也越大，也就是抵抗倾斜力矩的能力越强。但是横稳心高度过大，在风浪中摇摆很快，对设备使用、船员工作和生活都不利，故横稳心高度要适当。表 1.2.4-6 为各类船舶在设计排水量时横稳心高度的大致范围。

根据初稳心公式可求得引起船舶横倾 1°所需的倾侧力矩M_θ，即

$$M_\theta=\frac{Dh}{57.3} \quad (1.2.4\text{-}9\text{ a})$$

表 1.2.4-6　　各类船舶横稳心高度范围

船舶类型	h(m)	船舶类型	h (m)
客船	0.3～1.5	驱逐舰	0.7～1.2
干货船	0.3～1.0	护卫舰	0.6～1.0
油船	0.5～0.8	扫雷舰	0.7～0.9
渔船	0.5～1.0	猎潜艇	0.6～0.7
航空母舰	2.7～3.5	潜艇，水上	0.3～0.8
巡洋舰	0.8～2.7	潜艇，水下	0.2～0.4

如有横倾力矩M_Q作用于船上，则由此引起的横倾角度为

$$\theta^{\circ}=\frac{M_Q}{M_\theta} \tag{1.2.4-9 b}$$

2)纵稳心公式

如图 1.2.4-6 所示，可以求得船舶在纵倾时的回复力矩M_H为：

$$M_H=DH\sin\psi \tag{1.2.4-10}$$

此即为纵稳心公式。纵稳心M_z较重心G高得多，因此，一般不需考虑纵稳性不足问题。

通常用首尾吃水差t来表示船的纵倾情况，则可得：

$$M_H=DH\frac{t}{L} \tag{1.2.4-11}$$

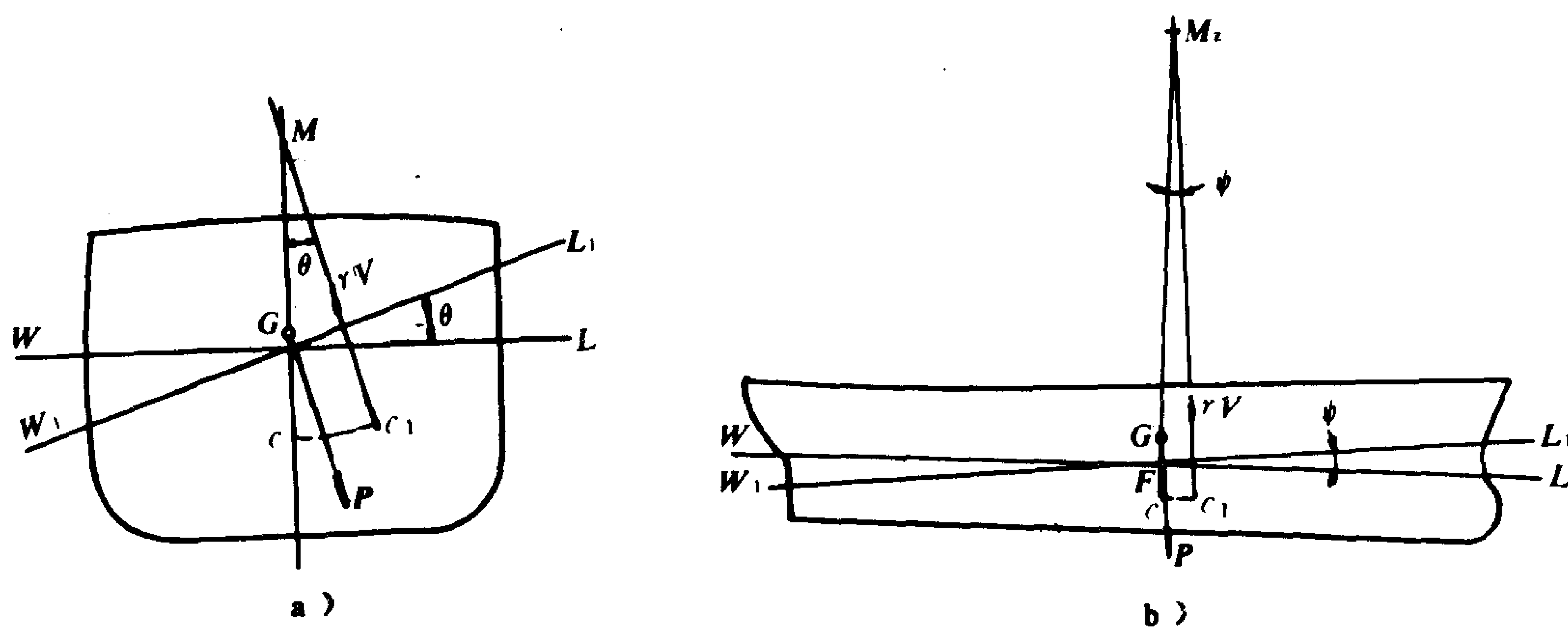


图 1.2.4-4　稳心及稳心半径

a)横倾时；b)纵倾时

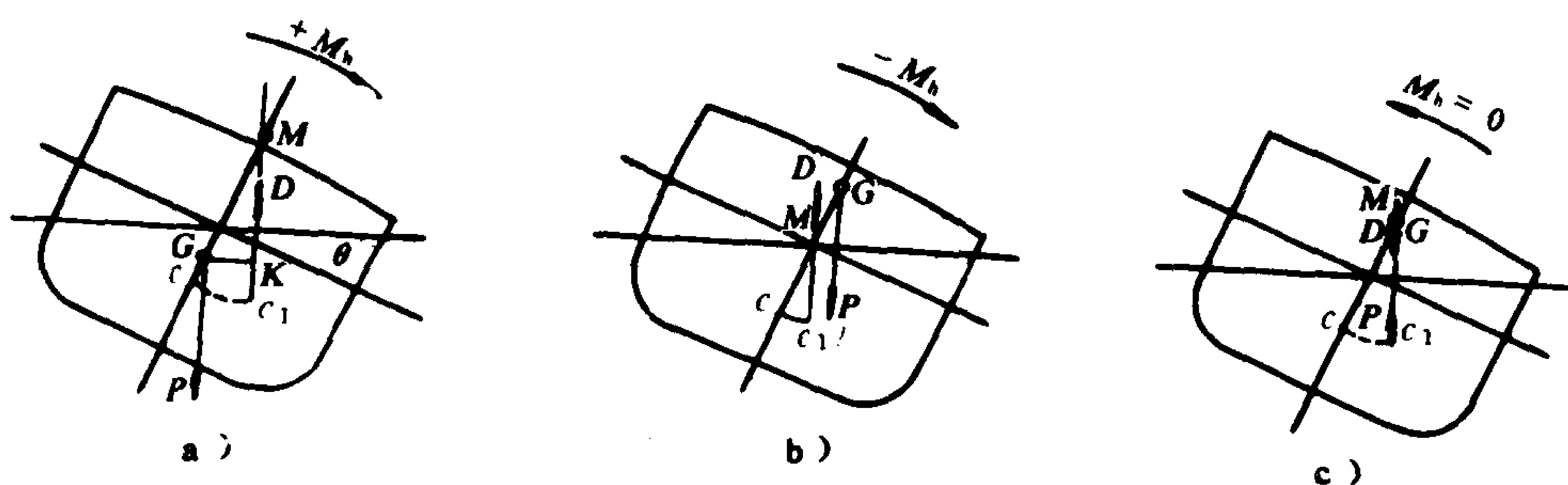


图 1.2.4-5　回复力矩M_h

a)G在M之下；b)G在M之上；c)G和M重合

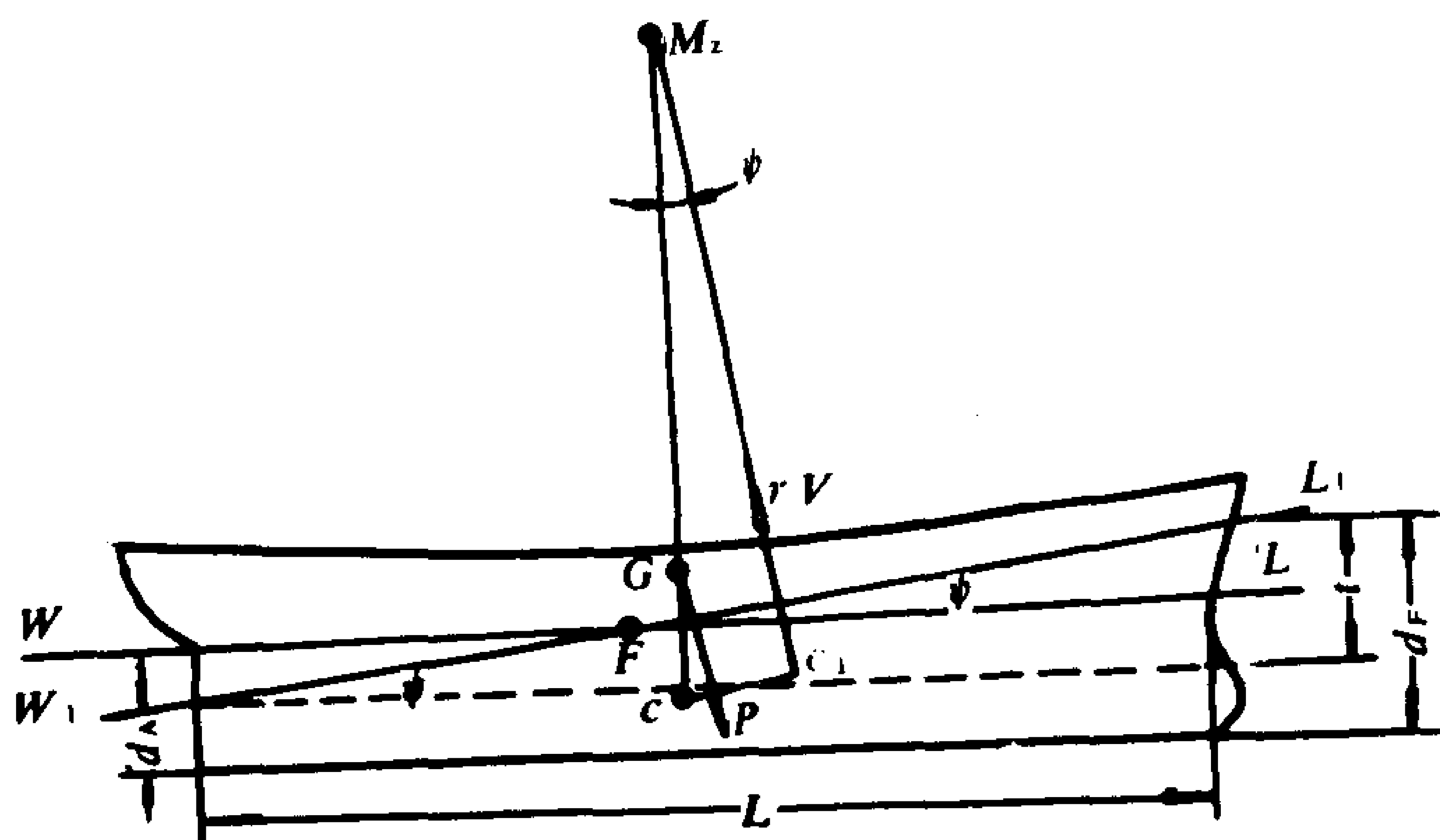


图 1.2.4-6　纵倾回复力矩

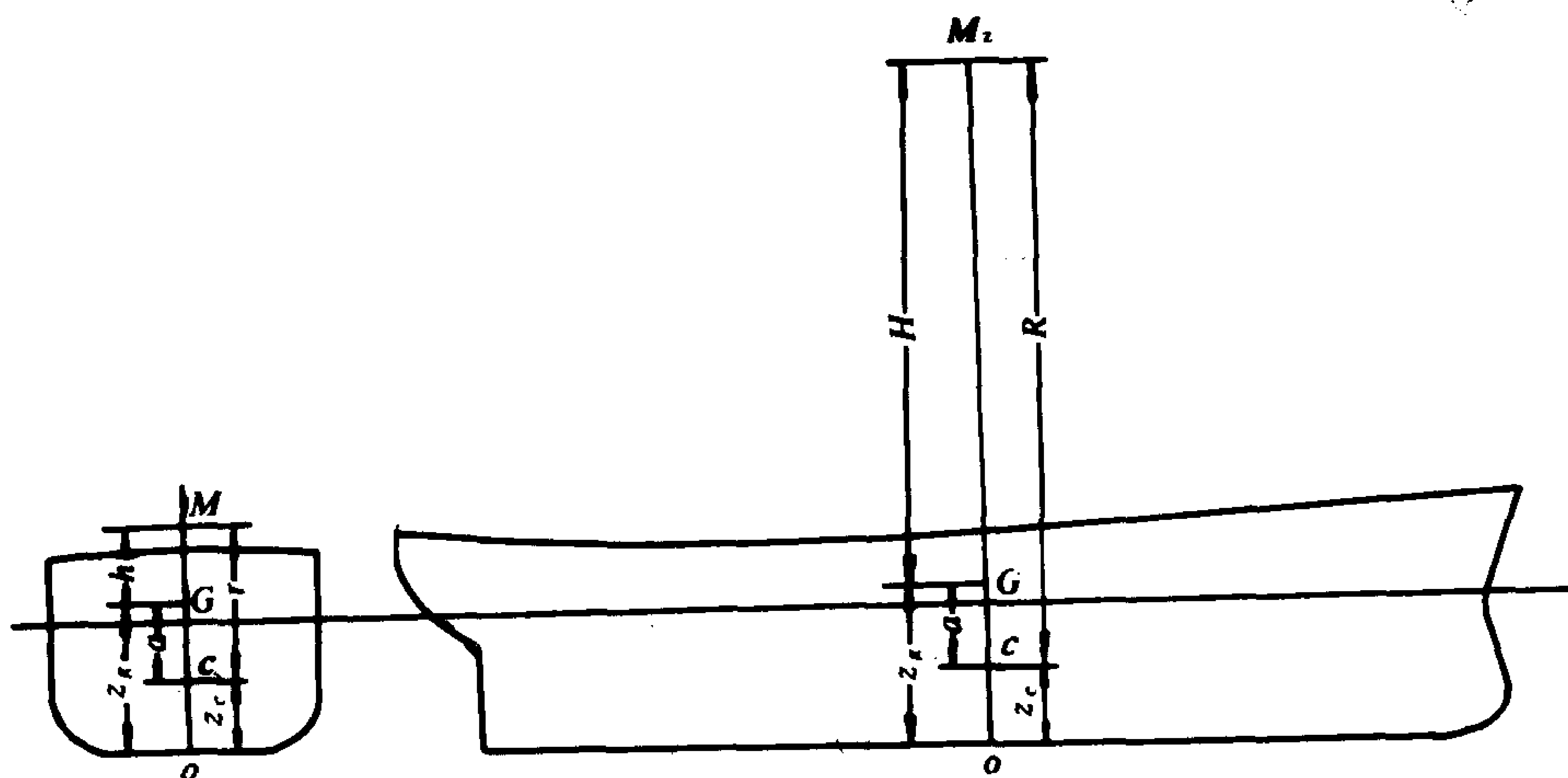


图 1.2.4-7　稳心高度

首倾时t取正值，尾倾时t取负值。据此可求得引起船舶纵倾 1 厘米所需的纵倾力矩M_{cm}为：

$$M_{cm}=\frac{DH}{100L} \tag{1.2.4-12}$$

此式还可写成：

$$M_{cm}=\frac{DR}{100L} \tag{1.2.4-13}$$

则由于纵倾力矩M_{ZQ}作用于船上所引起的纵倾t为：

$$t=\frac{M_{ZQ}}{M_{cm}} \tag{1.2.4-14}$$

3)稳心高度

船舶初稳性中最重要的问题是弄清浮心C，重心G和稳心M的位置以及三者之间的关系。初稳心高度h的表达式说明了这种关系。由图 1.2.4-7 即可写出下式：

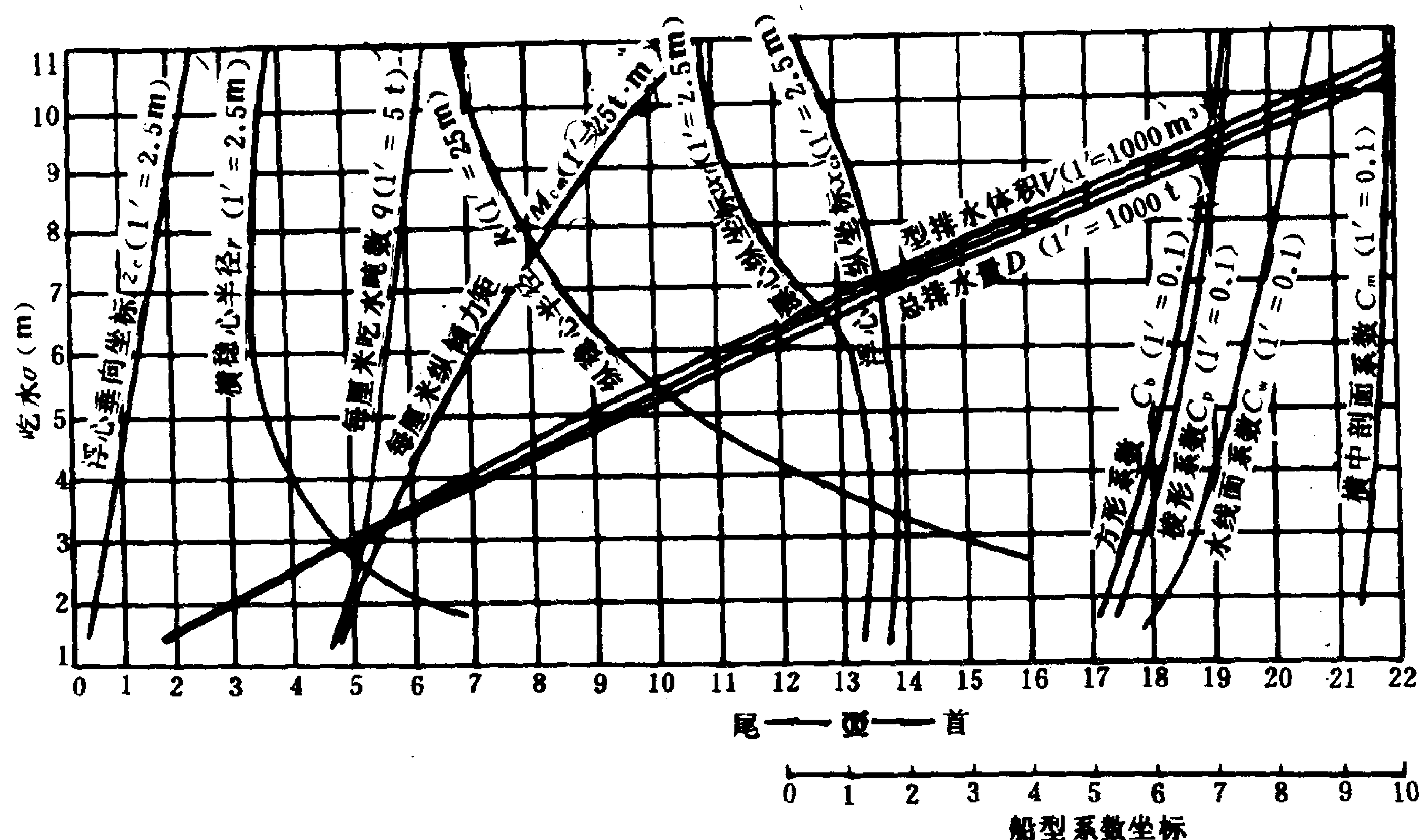


图1.2.4-8　静水力曲线图

$$h = z_c + r - z_g \tag{1.2.4-15}$$

同样，纵稳心高度H可写作：

$$H = z_c + R - z_g \tag{1.2.4-16}$$

船舶在某一排水量时的z_c、r、R可从静水力曲线图中查得，z_g可根据总布置图和结构图等资料进行估算，或倾斜试验测定。然后求出h、H。

2.8　船舶静水力曲线图

静水力曲线图全面表达了船舶在静止正浮状态下的浮性和稳性要素随吃水而变化的规律。图中一般应包括下列曲线：

1)型排水体积V曲线；
2)总排水体积V_k曲线；
3)总排水量D曲线；
4)浮心纵坐标X_c曲线；
5)浮心垂向坐标Z_c曲线；
6)水线面面积A_w曲线；
7)漂心纵坐标X_f曲线；
8)每厘米吃水吨数TPC曲线；
9)横稳心半径r曲线（或横稳心垂向坐标Z_m曲线）；
10)纵稳心半径R曲线（或纵稳心垂向坐标Z_{mz}曲线）；
11)每厘米纵倾力矩M_{cm}曲线；

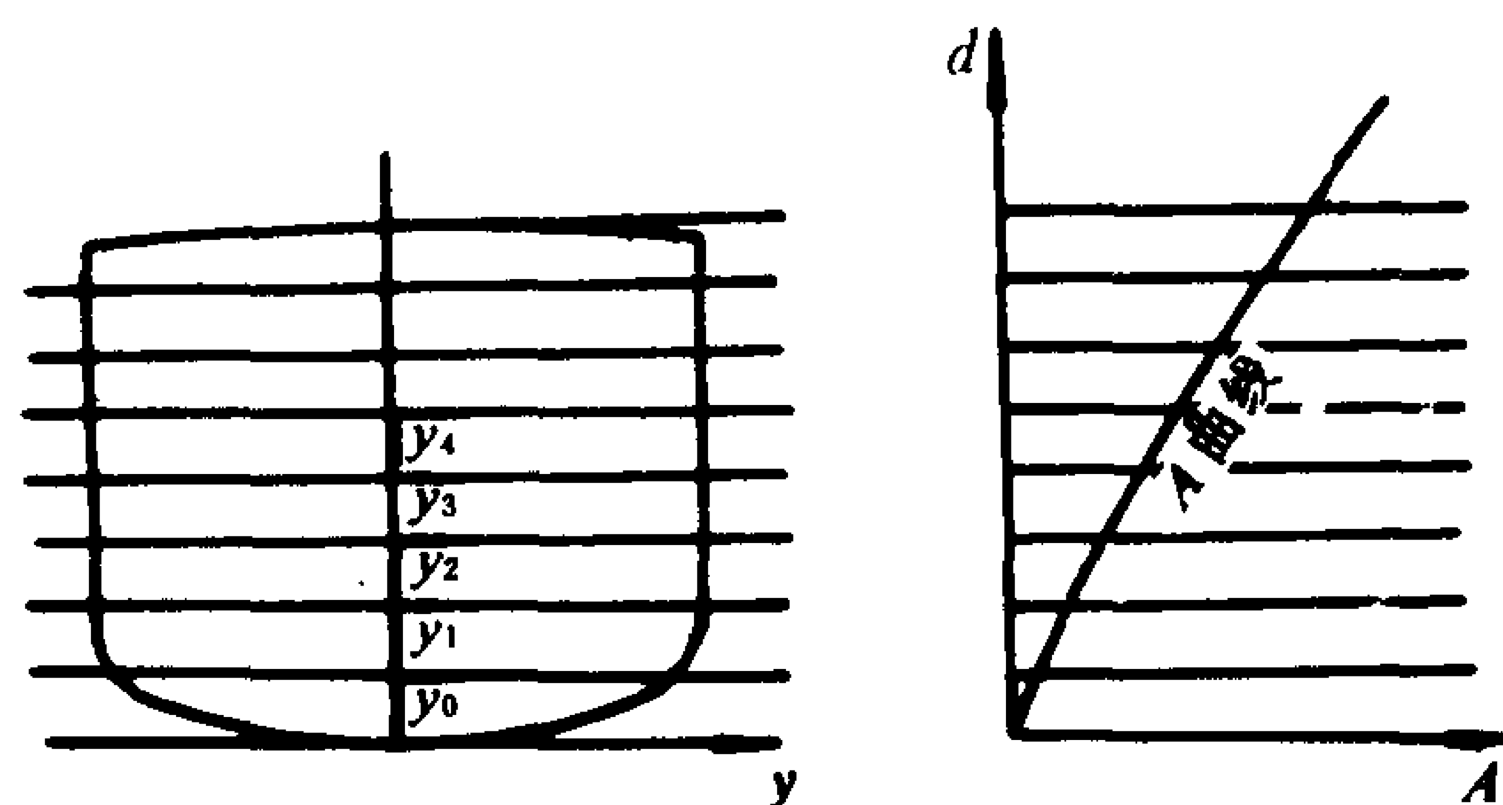


图 1.2.4-9　某横剖面面积曲线

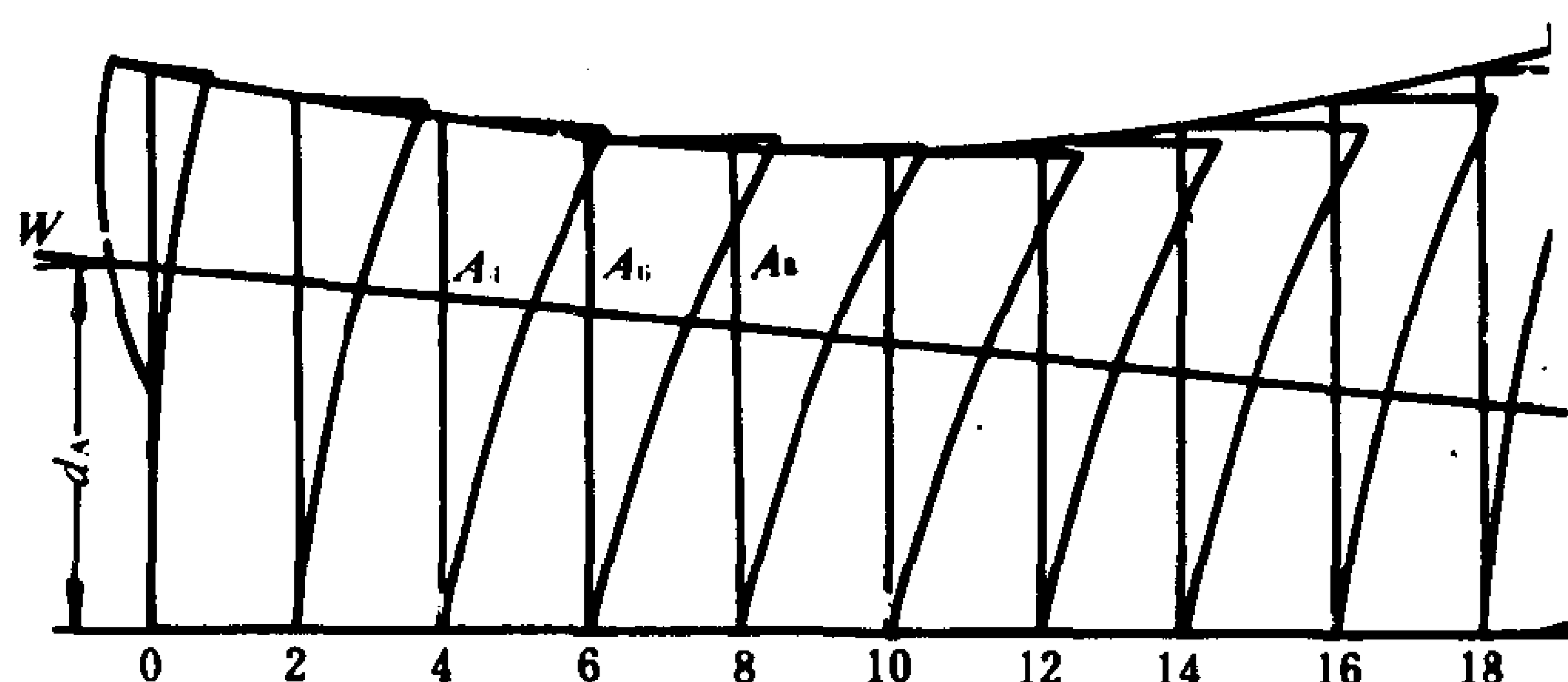


图 1.2.4-10　邦戎曲线

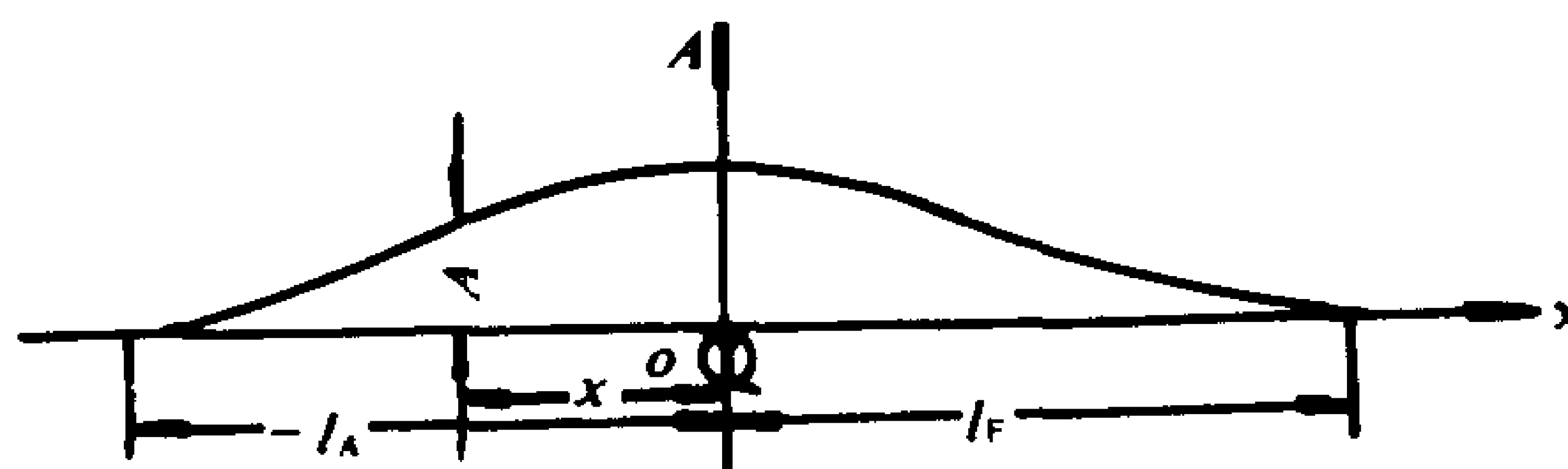


图 1.2.4-11　横剖面面积曲线

12）水线面系数C_w曲线；

13）横中剖面系数C_m曲线；

14）方形系数C_b曲线；

15）棱形系数C_p曲线。

静水力曲线由船厂或设计部门制定。图 1.2.4-8 为"风光"号的静水力曲线示意图。

2.9　船舶在纵倾状态下排水量和浮心坐标计算

2.9.1　邦戎曲线（Bonjean's curves）

是一族表示各横剖面面积随吃水变化的曲线。通常在船长范围内分成 20 等分，在每一等分处，作一条横剖面面积随吃水变化的曲线$A=f(d)$，如图 1.2.4-9 所示，通常按表 1.2.4-7 进行计算，表中y_i为各横剖面的半宽坐标。将所有横剖面面积曲线画在纵剖面的相应位置上，即为邦戎曲线，如图 1.2.4-10 所示。利用邦戎曲线可求得倾差状态下的排水体积和浮心纵向坐标。例如，已知首尾吃水为d_F和d_A，则可在邦戎曲线上作一条倾差水线WL。通过WL与X处垂线的交点，作水平线，并交于曲线，量取其水平距离即得X处的横剖面面积A，从而可画出如图 1.2.4-11 所示的横剖面面积曲线$A=f$（x），这样，在WL水线下的排水体积和浮心

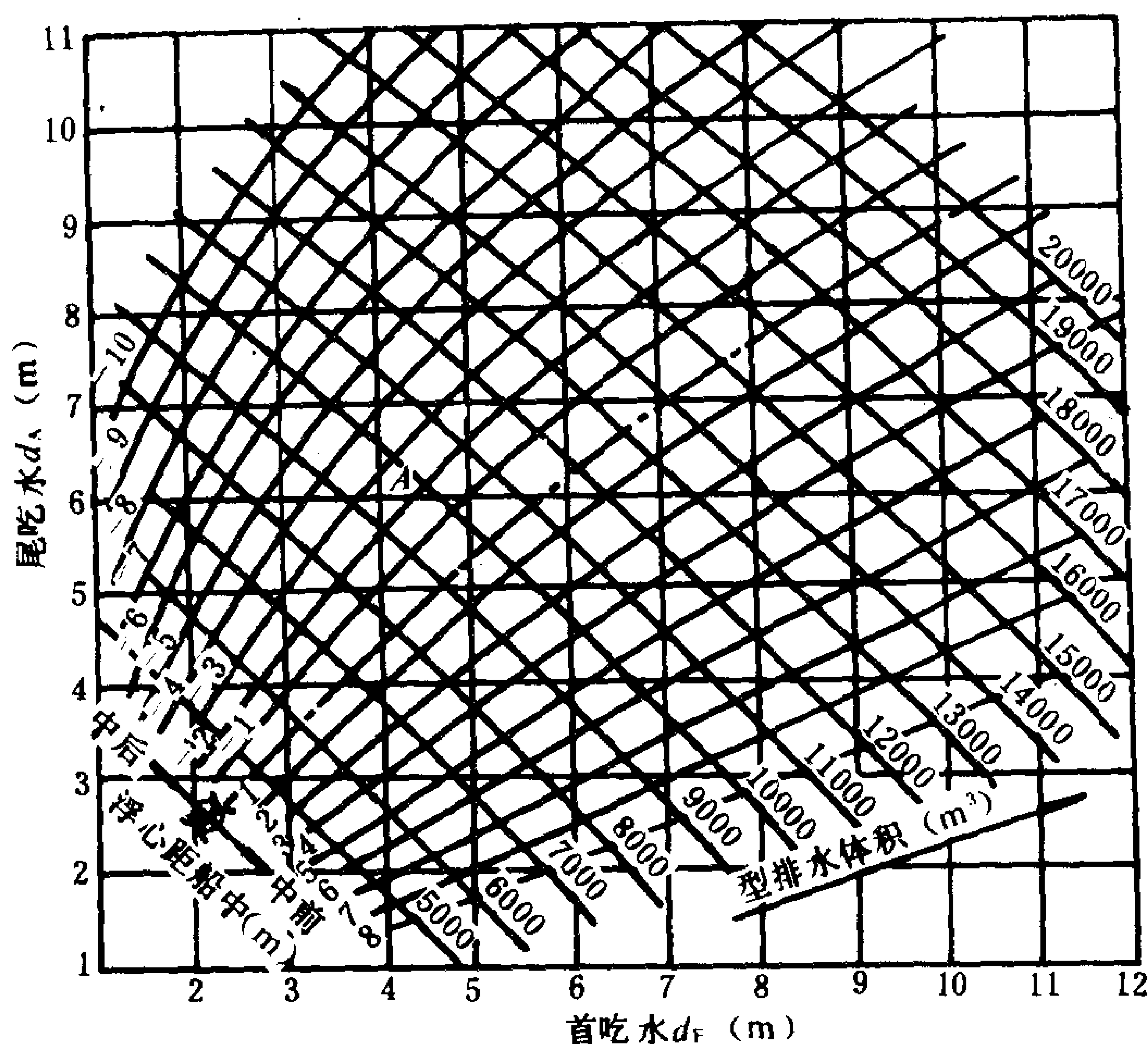


图 1.2.4-12　费尔索夫曲线

纵向坐标，即可按下面公式算出：

$$V=\frac{L}{20}\left(\frac{A_0}{2}+A_1+\cdots+A_{19}+\frac{A_{20}}{2}\right) \tag{1.2.4-17}$$

$$X_c=\left(\frac{L}{20}\right)^2\left[\frac{10A_{20}}{2}+9A_{19}+\cdots+(-9)A_1+\frac{(-10)A_0}{2}\right] \tag{1.2.4-18}$$

表 1.2.4-7　**横剖面面积计算**

水线号	半宽型值y_i	成对和	自上至下之和	横剖面积 $A=\Delta d\times$(Ⅳ)
Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
0	y_0	—	—	—
1	y_1	y_0+y_1	y_0+y_1	A_1
2	y_2	y_1+y_2	$(y_0+y_1)+(y_1+y_2)$	A_2
3	y_3	y_2+y_3	$(y_0+y_1)+(y_1+y_2)+(y_2+y_3)$	A_3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2.9.2　费尔索夫曲线（Firsov's curves）

为了使用方便，可以根据邦戎曲线求得不同纵倾水线下的排水体积和浮心纵向坐标值，然后画出等排水体积曲线和等浮心纵坐标曲线，此即费尔索夫曲线。如图 1.2.4-12 所示。图中：横坐标表示首吃水d_F，纵坐标表示尾吃水d_A。若已知该船的首尾吃水，则可在图上根据首尾吃水的交点，从两组等值曲线上迅速查得其相应的排水体积和浮心纵坐标值。例如：已知$d_F=4$ m，$d_A=6$ m。则在图上交点A处读得$V=9300$ m^3，$X_c=-2.58$ m。

2.10　舷外水的密度改变时船舶浮态的变化

船舶由密度ρ_1的水域驶入密度为ρ_2水域时，吃水的改变量为Δd，则有

$$\Delta d = \frac{V \ (\rho_1 - \rho_2)}{A_w \rho_2} \qquad (1.2.4\text{-}19)$$

式中，V、A_w为船舶在密度为ρ_1水域中的排水量和水线面面积。由此式可知：当$\rho_1 > \rho_2$时，$\Delta d > 0$，即船舶由密度大的水域驶向密度小的水域时，吃水要增加。当$\rho_1 < \rho_2$时，$\Delta d < 0$，即船舶由密度小的水域驶向密度大的水域时，吃水要减小。由于船舶吃水改变，船舶的水下体积也要改变，浮心位置也将略有变化。一般地说，吃水增加时，由于船尾较首肥大些，因此浮心将往船尾方向移动，而重心位置不变，则将发生首倾。吃水减小时，浮心往船首方向移动，则将发生尾倾。

3 船舶在各种装载情况下浮态和初稳性的计算

3.1 移动载荷对船舶浮态和稳性的影响

如图 1.2.4-13 所示，将重量为p的载荷自A点（x_1、y_1、z_1）移至B点（x_2、y_2、z_2），船舶稳心高、横倾和纵倾均发生变化。

3.1.1 新的稳心高度

$$h_1 = h - \frac{p(z_2 - z_1)}{D} \qquad (1.2.4\text{-}20)$$

$$H_1 = H - \frac{p(z_2 - z_1)}{D} \approx H \qquad (1.2.4\text{-}21)$$

3.1.2 横倾角度

$$\text{tg}\theta = \frac{p(y_2 - y_1)}{Dh_1} \qquad (1.2.4\text{-}22)$$

3.1.3 纵倾角度

$$\text{tg}\psi = \frac{p(x_2 - x_1)}{DH} \qquad (1.2.4\text{-}23)$$

3.1.4 首尾吃水的变化

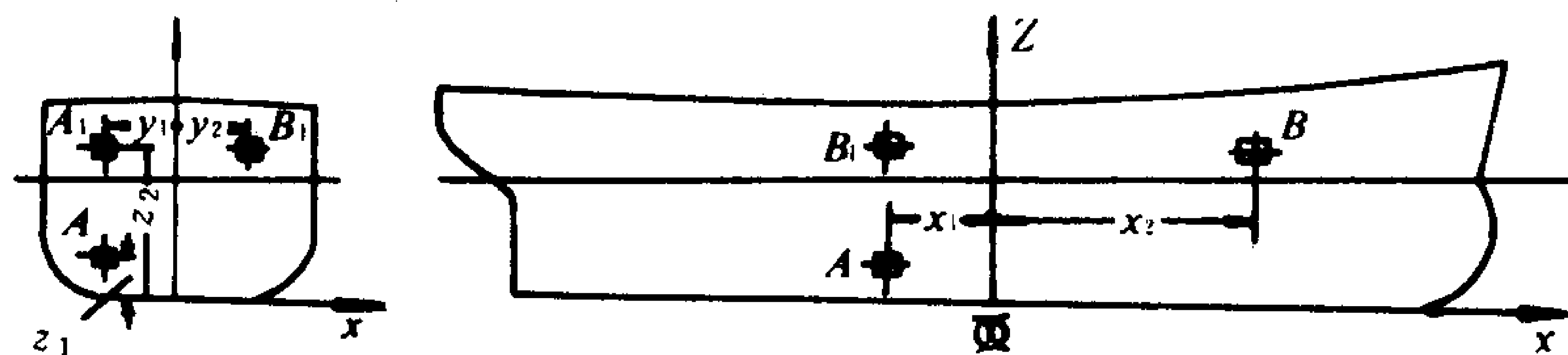


图 1.2.4-13 载荷的任意移动

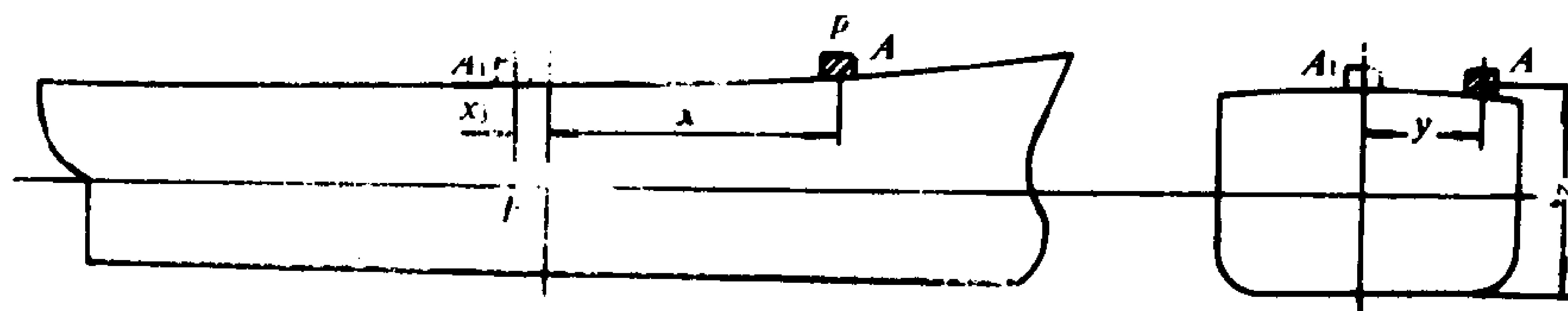


图 1.2.4-14 装卸载荷

$$\Delta d_F=(\frac{L}{2}-x_f)\frac{p(x_2-x_1)}{DH} \quad (1.2.4\text{-}24)$$

$$\Delta d_A=-(\frac{L}{2}+x_f)\frac{p(x_2-x_1)}{DH} \quad (1.2.4\text{-}25)$$

3.1.5 最终首尾吃水

$$d_F'=d_F+\Delta d_F \quad (1.2.4\text{-}26)$$

$$d_A'=d_A+\Delta d_A \quad (1.2.4\text{-}27)$$

式中，x值在船中前取正，船中后取负；y值在右舷取正，在左舷取负；z值在基线以上取作正；横倾角θ向右舷倾侧取正，向左舷倾侧取负；纵倾角ψ首倾取正，尾倾取负。

3.2 装卸小量载荷对船舶浮态和初稳性的影响

如图 1.2.4-14 所示，把重量为p的载荷装在船上A处(x、y、z)，则由此而引起船舶浮态和稳性的变化如下：

3.2.1 平均吃水增量

$$\Delta d=\frac{p}{rA_w} \quad (1.2.4\text{-}28)$$

3.2.2 新的稳心高度

$$h_1\approx h=\frac{p}{D+p}(d+\frac{\Delta d}{2}-z-h) \quad (1.2.4\text{-}29)$$

$$H_1=\frac{D}{D+p}H \quad (1.2.4\text{-}30)$$

3.2.3 横倾角

$$tg\theta=\frac{py}{(D+p)h_1} \quad (1.2.4\text{-}31)$$

3.2.4 纵倾角

$$tg\psi=\frac{p(x-x_f)}{(D+p)H_1} \quad (1.2.4\text{-}32)$$

3.2.5 首尾吃水变化

$$\Delta d_F=(\frac{L}{2}-x_f)\frac{p(x-x_f)}{(D+p)H_1} \quad (1.2.4\text{-}33)$$

$$\Delta d_A=-(\frac{L}{2}+x_f)\frac{p(x-x_f)}{(D+p)H_1} \quad (1.2.4\text{-}34)$$

3.2.6 最终首尾吃水

$$d_F'=d_F+\Delta d+\Delta d_F \quad (1.2.4\text{-}35)$$

$$d_A'=d_A+\Delta d+\Delta d_A \quad (1.2.4\text{-}36)$$

在卸去小量载荷的情况下，须将重量p改为$-p$。由 1.2.4-29 式可知，装卸前后初稳心高度的差值Δh，除与

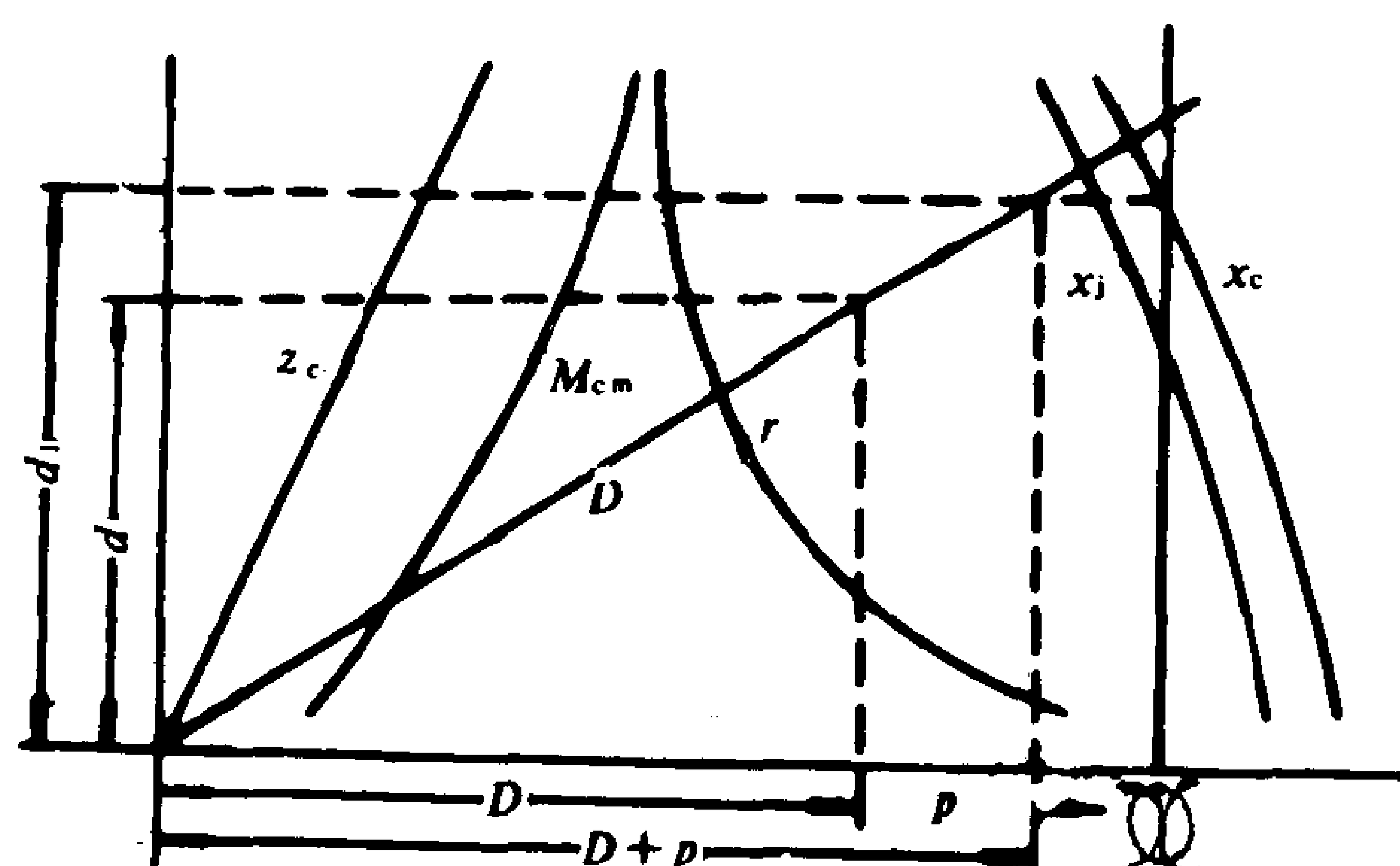


图 1.2.4-15 静水力曲线

$\frac{p}{D+p}$值有关外，主要与Z值有关。显然，要使装卸前后的初稳心高度不变其条件为：

$$Z=d+\frac{\Delta d}{2}-h$$

装卸载荷的重心距基线高度Z等于$d+\frac{\Delta d}{2}-h$的水平面称为"初稳心高度界限面"。当所装卸载荷p的重心在界限面中，则初稳心高度不变。当加载重心在界限面以上时，初稳心高度减小；当加载重心在界限面以下，初稳心高度增大。卸载相反。利用界限面的概念，对解决少量装卸载荷对初稳性的影响，提供了简便的方法。

3.3 装卸大量载荷对船舶浮态和初稳性的影响

当船上装卸大量载荷（超过排水量的 10%）时，应该根据静水力曲线中的有关资料计算船舶的浮态和稳性，才能得到比较正确的结果。当船上装大量载荷p吨后，排水量变为：

$$D_1=D+p \tag{1.2.4-37}$$

如p的重心在（x、y、z）处，则船重心在：

$$x_{g1}=\frac{Dx_g+px}{D+p} \tag{1.2.4-38}$$

$$Z_{g1}=\frac{DZ_g+pz}{D+p} \tag{1.2.4-39}$$

在静水力曲线图的横轴上截取排水量$D+p$，从这点作垂线与排水量曲线相交。再从交点引水平线与纵坐标轴相交，即得相应的正浮吃水d_1、如图 1.2.4-15 所示。根据吃水d_1可从有关曲线上查得x_c，z_c，r，x_f，M_{cm}等数值。则可求得：

初稳心高度
$$h_1=z_c+r-z_{g1} \tag{1.2.4-40}$$

横倾角
$$\mathrm{tg}\theta=\frac{py}{(D+p)h_1} \tag{1.2.4-41}$$

纵倾力矩
$$Mz_Q=(D+p)(x_{g1}-x_c) \tag{1.2.4-42}$$

船的纵倾
$$t=\frac{M_{ZQ}}{100M_{cm}} \tag{1.2.4-43}$$

首尾吃水
$$d_F=d_1+(\frac{L}{2}-x_f)\frac{t}{L} \tag{1.2.4-44}$$

$$d_A=d_1-(\frac{L}{2}+x_f)\frac{t}{L} \tag{1.2.4-45}$$

对于卸去载荷，应用有关公式时把p改为$-p$。

装卸载荷对稳性影响大，应减少高载荷，防止底部轻载。上甲板结冰要及时敲除，必须高放重大载荷或大量在底部卸载时，事先要预估稳度是否许可。

3.4 液体载荷对初稳性的影响

当船上液体舱柜未装满液体而具有自由液面的流动载荷时，如图 1.2.4-16 所示，船舶稳心高：

$$h_1=h-\frac{r_1 i_x}{rV} \tag{1.2.4-46}$$

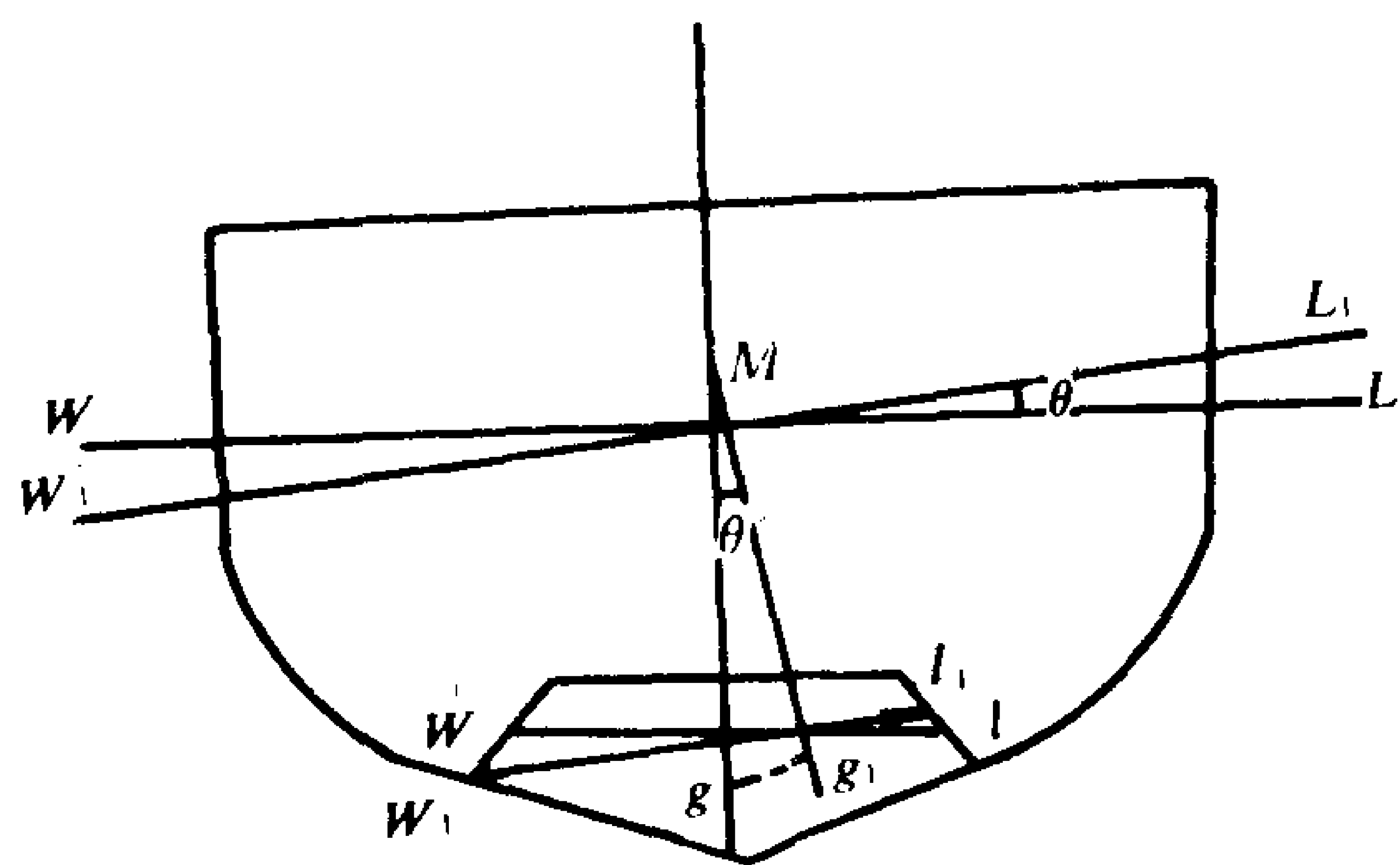


图 1.2.4-16　船内液体的自由液面

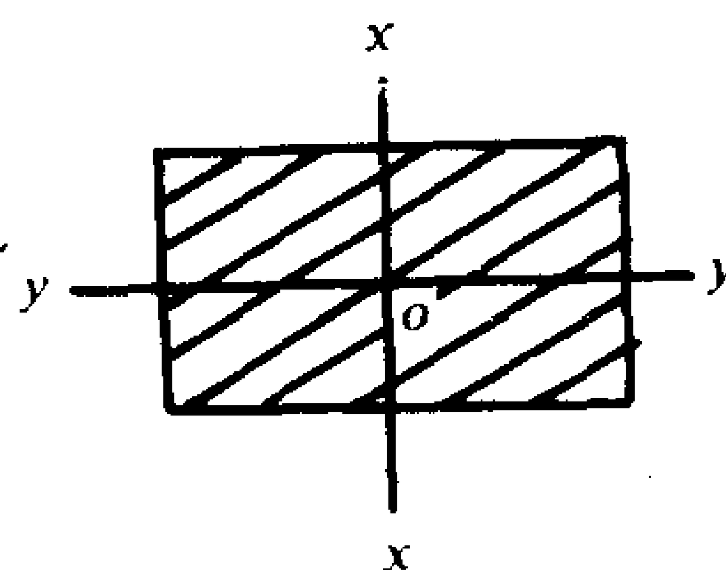


图 1.2.4-17　倾斜试验

$$H_1 = H - \frac{r_1 i_y}{rV} \qquad (1.2.4\text{-}47)$$

式中：h、H——假设载荷是固体，而不是液体时求出的稳心高，m；

r_1、r——液体载荷和舷外水的重度，t/m^3；

i_x、i_y——自由液面面积对其倾斜轴的惯性矩，$i_x = \frac{lb^3}{12}$，$i_y = \frac{bl^3}{12}$；

其中：l、b——有自由液面的舱室长和宽，m。

自由液面对船舶稳性影响很大，因此，必须注意：

（1）随时吸干舱底积水；

（2）用水灭火时注意同时排除甲板上的积水，特别是贯通两舷的舱内积水；

（3）大风浪中要确保舷墙排水口的畅通，使能及时排掉甲板上浪引起的积水；

（4）舱壁必须保持水密，防止破损时渗水形成自由液面；

（5）干舷破口也必须及时堵塞，因它是形成高位置舱室自由液面的根源之一；

（6）舱室尤其是大舱室破损进水或渗水，应立即排水并堵塞破口；

（7）装油装水和用油用水均应按设计规定的顺序进行。若缺乏使用次序的资料，应本着减少自由液面的影响，保持重心较低和不引起横倾纵倾的原则。如用时应“先高后低，先远后近，对称使用”。

3.5　用倾斜试验确定船舶的初稳心高度和重心高度

倾斜试验的目的在于利用船内重物水平横移的方法，以确定其空船重心距基线高。如图 1.2.4-17 所示，根据重物p水平横移后船舶的横倾角θ和摆锤的摆距a、悬距b，又根据倾斜力矩等于回复力矩可得：

$$h = \frac{pl}{D\mathrm{tg}\theta} = \frac{plb}{rVa} \qquad (1.2.4\text{-}48)$$

式中，p、l、r、a、b均可通过实测求得，V可由实测的吃水，查静水力曲线或邦戎曲线求得，于是求得试验状态的初稳心高度h值。再由$h = z_m - z_g$，z_m可由静水力曲线查得。则试验状态船舶重心距基线高z_g即求出。由于试验时仍有少量设备未安装上船，并有少量施工设备和试验重量未拿下船，所以空船重量为：

$$D_0 = rV + \sum p_j - \sum p_i$$

式中：D_0——空船重量；

rV——试验状态排水量；

$\sum p_j$——试验状态船上不足重量；

$\sum p_i$——试验状态船上多余重量。

最后，根据不足和多余重量及其重心坐标，并根据装卸重量后船舶重心的计算公式算出空船重心距基线高Z_g。

为保证试验的准确性，试验应在风流较小的水域进行，应测量水的密度，注意减少液体舱柜的自由液面影响，尽可能减少船上工作人员。

3.6 船舶进出坞时的初稳性保持

3.6.1 墩木的最大反作用力

为了保证修理中的安全，船舶入坞前需要卸去油水和危险品等物，这时船舶往往有一定的尾倾。船舶入坞后，随着坞内排水，船舶将平行下沉，尾柱先与墩木A点接触，在A处，如图 1.2.4-18 所示，出现墩木对船尾的反作用力P。在P的作用下，使船原有的尾倾减小。P值随船舶下落而逐渐增大，当船舶龙骨线与坞底前后墩不贴合的瞬间达最大值P_m。反作用力P_m可理解为在A点处卸去的重物P_m，则

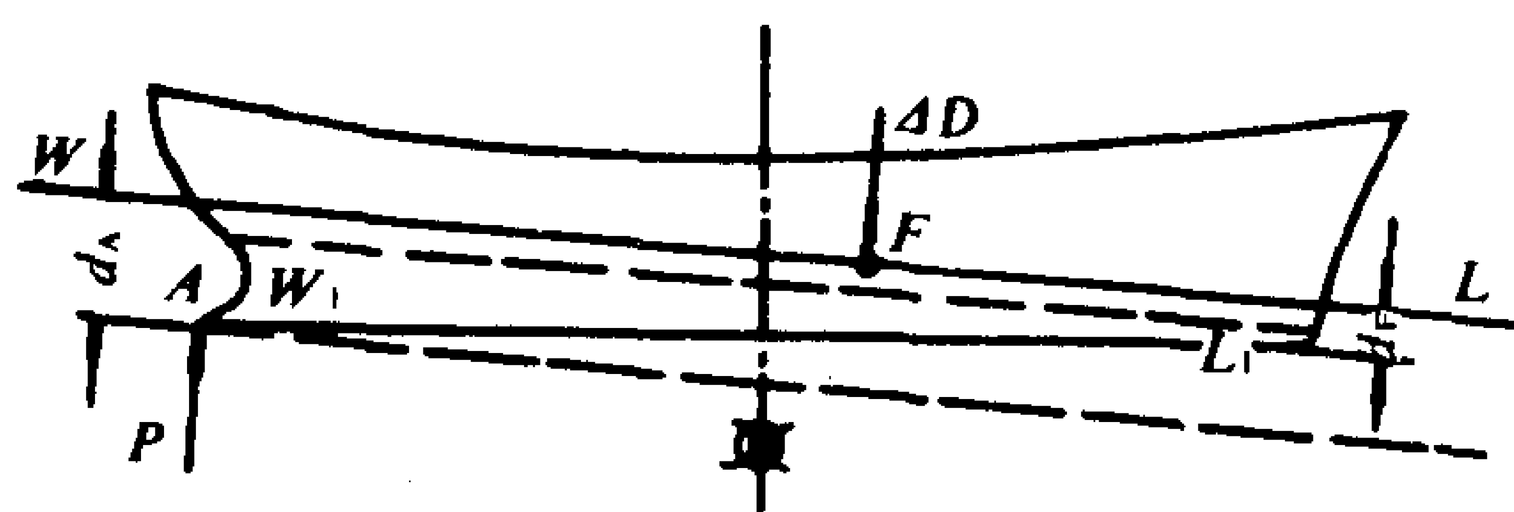


图 1.2.4-18 墩木反作用力

$$P_m=\frac{M_{cm}(d_F-d_A)}{(\frac{L}{2}+x_f)} \quad (1.2.4\text{-}49)$$

式中：d_F、d_A——船舶全浮时的首、尾吃水。

由此可见，P_m值的大小取决于船舶全浮时的M_{cm}和吃水差$\Delta dm=d_F-d_A$。为了避免出现过大的P_m值，船舶在进坞前应减少进坞重量和将吃水差调整到适当值。

3.6.2 丧失稳性的临界吃水

船舶进坞后，当水位下降时船的横稳性将不断减小以至丧失。为此，必须在船丧失稳性前采取一定措施，以防止船在坞内倾倒。

设船全浮时吃水为d，水线为WL，如图 1.2.4-19 a）所示，当水线下降至W_1L_1时，位于A点的墩木反作用力对稳性的影响，相当于在A点卸去一重物P。故初稳心公式变为：

$$M_h=(Dh-Pa)\sin a$$

式中：D、h——全浮时重量排水量与初稳心高度；

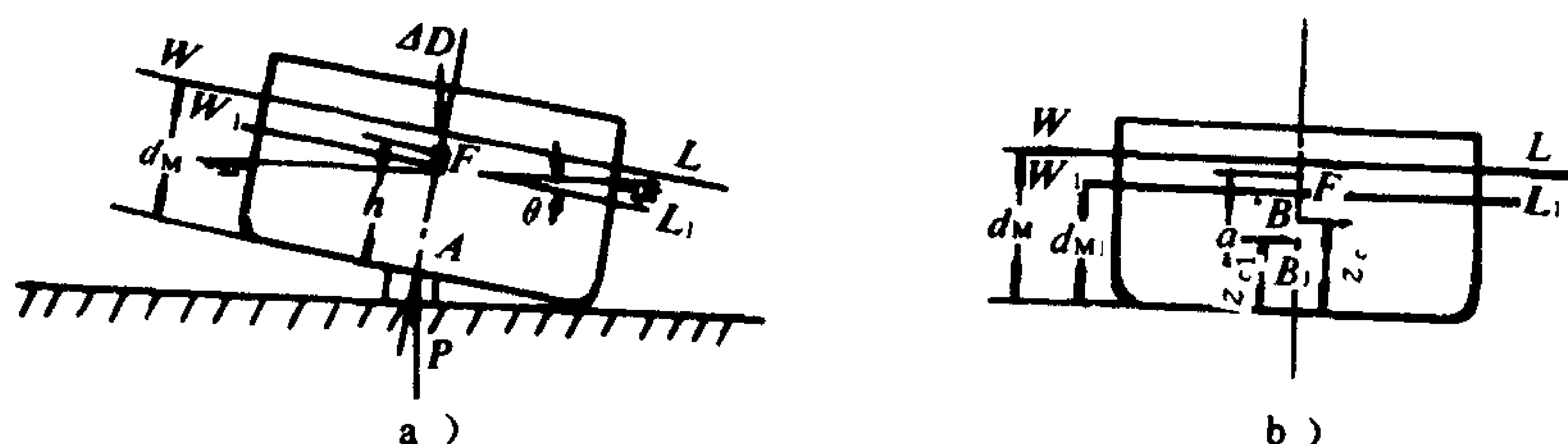


图 1.2.4-19 坞内横稳性

a——WL和W_1L_1间所失去浮力ΔV的中心F至A点的垂距。

当$Dh = Pa$时，船即丧失稳性。显然，Pa随W_1L_1水线的下降而改变如图 1.2.4-19 b）所示，根据合力矩定理有：

$$Pa = DZ_c - D_1Z_{c1} \tag{1.2.4-50}$$

式中：D、Z_c——全浮时（d）排水量和浮心距基线高；

D_1、Z_{c1}——W_1L_1水线下（d_1）的排水量和浮心距基线高。

各吃水d_1时D_1和Z_{c1}值可从静水力曲线图上查得。故可根据式(1.2.4-50)画出如图 1.2.4-20 所示的$Pa = f$（d）曲线。在该曲线上可找得当$Dh = Pa$时的临界吃水d_k。当水位降至d_k前，必须采取防倾措施。

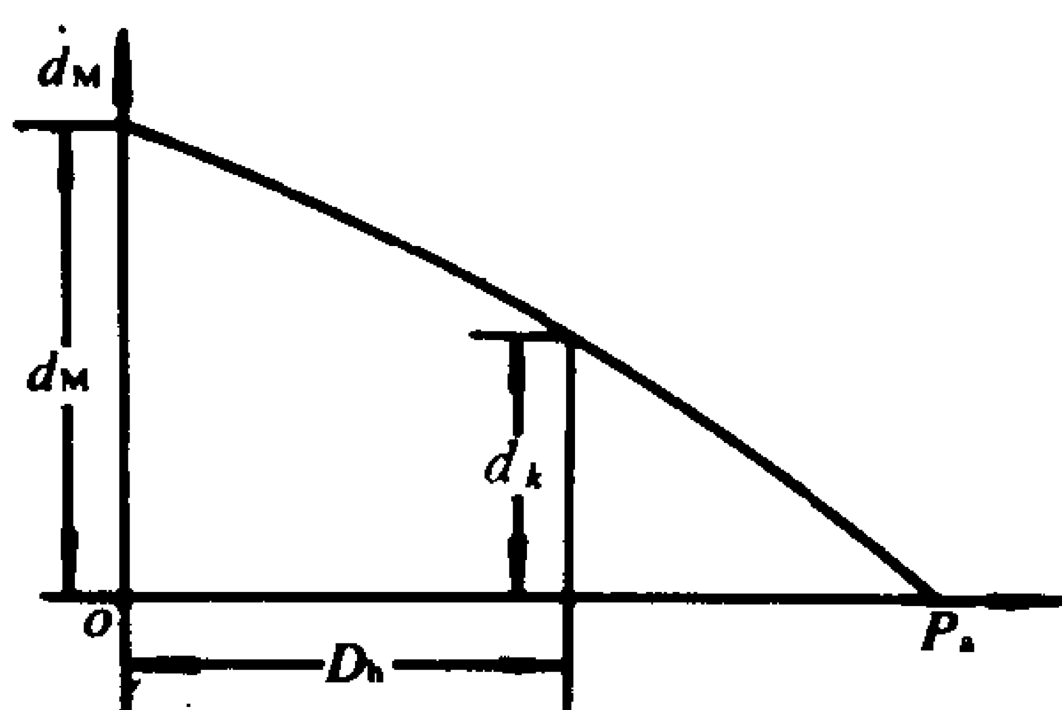


图 1.2.4-20　Pa曲线

3.7　船舶搁浅

船舶搁浅时，为了采取施救措施，需要知道船底搁浅位置x_p和y_p，如图 1.2.4-21 所示及船底所受反作用力p的大小。

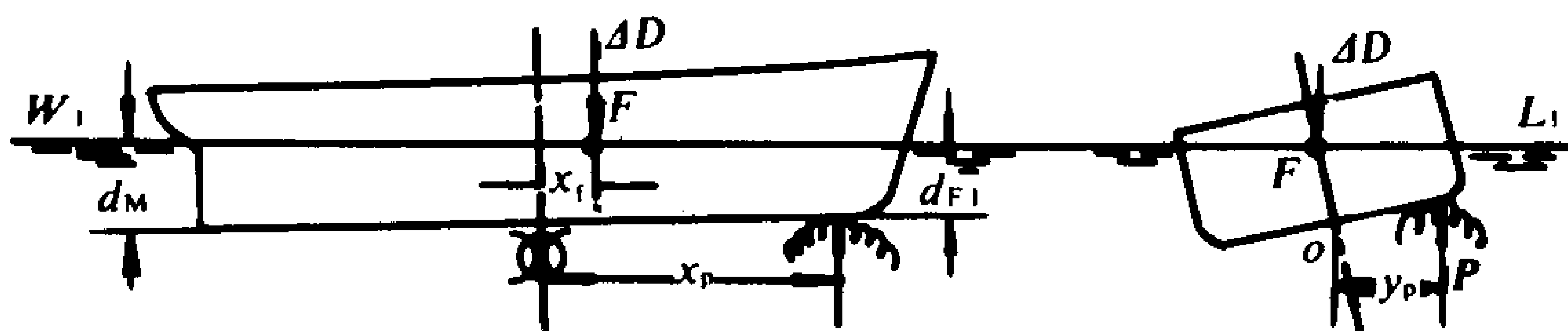


图 1.2.4-21　船舶搁浅

3.7.1　船底所受反作用力

$$\left.\begin{aligned} P &= D - D_1 \\ P &= (d_m - d_{m1}) \times 100 \times TPC \end{aligned}\right\} \tag{1.2.4-51}$$

式中：$d_m = \dfrac{d_F + d_A}{2}$，$d_{m1} = \dfrac{d_{F1} + d_{A1}}{2}$

d_F，d_A——搁浅前全浮时的首尾吃水；

d_F'、d_A'——搁浅后测得首尾吃水。

根据d_{m1}从静水力曲线图上查得搁浅后的排水量为D_1。

3.7.2 船舶搁浅位置

通过船底所受反作用力所引起的纵倾力矩$P(x_p - x_f)$被纵倾1厘米力矩M_{cm}除，可得出搁浅前后吃水差改变量Δt，从而可解出：

$$x_p = \frac{M_{cm} \cdot \Delta d}{p} + x_f \qquad (1.2.4\text{-}52)$$

$$\Delta t = t - t_1 = (d_F - d_A) - (d_{F1} - d_{A1}) \qquad (1.2.4\text{-}53)$$

式中：t——全浮时吃水差；

t_1——搁浅后吃水差。

根据船舶搁浅后横倾力矩py_p与复原力矩M_h相等可得：

$$y_p = \frac{D_1 h_1}{p} \mathrm{tg} \Delta\theta \qquad (1.2.4\text{-}54)$$

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta_1$$

式中：θ_0——全浮时横倾角；

θ_1——搁浅后横倾角。

$$h_1 = h + \Delta h$$

船底所受反作用力P，可看成是在(x_p, y_p, θ)处减少的一个载荷，故搁浅后横稳心高度改变为：

$$\Delta h = \frac{-p}{D-p}\left(d - \frac{\Delta d}{2} - h\right)$$

式中：Δd——平均吃水的改变。

4 大倾角横稳性

4.1 大倾角下回复力矩公式

在大倾角（大于15°）条件下，倾斜前后两浮力作用线并不象小角倾斜条件下交在定点M上，如图1.2.4-22 a）所示，故静稳性臂只能用下式来表示。

$$l = \overline{GZ} = l_\theta - \overline{C_0 G} \sin\theta \qquad (1.2.4\text{-}55)$$

式中，$l_\theta = C_0 R$为浮心沿水平横向移动的距离，其数值由排水体积的形状所决定，因此称为形

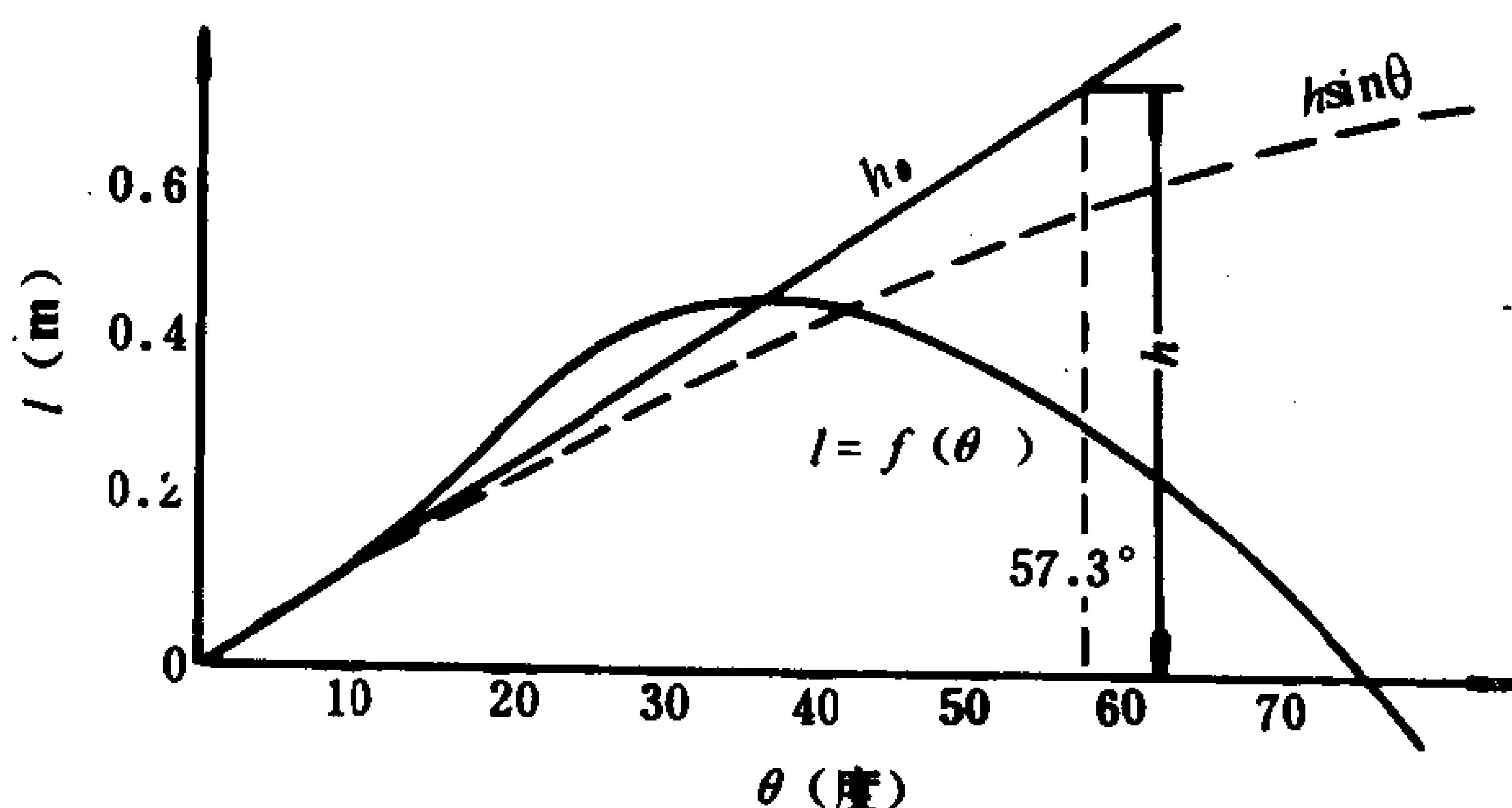


图1.2.4-22 回复力矩与静稳性曲线

状稳性力臂；

$C_0G\sin\theta = C_0E$ 其数值主要由重心的位置所决定，因此称为重量稳性力臂。

静稳性力臂l随横倾角θ的变化规律不能用简单的公式来表示。通常根据计算结果绘制成静稳性曲线图，如图 1.2.4-22 所示，它表示船舶在不同倾角时回复力矩（或力臂）的大小。

4.2 静稳性曲线的特征

4.2.1 静稳性曲线在原点处的斜率

当船舶的横倾角θ很小时，其回复力矩M_h可用静稳性臂表示（$M_h = Dl$），也可用初稳心高度表示（$M_h = Dh\sin\theta$），因此有：

$$l = h\sin\theta$$

则

$$\left(\frac{dl}{d\theta}\right)_{\theta=0} = h$$

即静稳性臂曲线在原点处的斜率等于初稳心高度h。因此，若有了静稳性曲线图，可以通过原点o作曲线的切线，再在横坐标上取$\theta = 57.3°$，作垂线与切线相交，该交点的纵坐标值，即为初稳心高度h。初稳心高愈大，曲线初段愈陡。

4.2.2 极限横倾力矩和极限静倾角

静稳性曲线的最高点B，如图 1.2.4-23 所示，它表示船舶在横倾过程中所能产生的最大回复力矩。因此，与B点相切的水平线为船舶能承受的极限横倾力矩MQ_{max}，若外来的横倾力矩超过此极限数值，则船将倾复。与B点相对应的横倾角称为极限静倾角θ_{max}。《海船稳性规范》规定，θ_{max}应不小于 30°。

4.2.3 稳定平衡与不稳定平衡

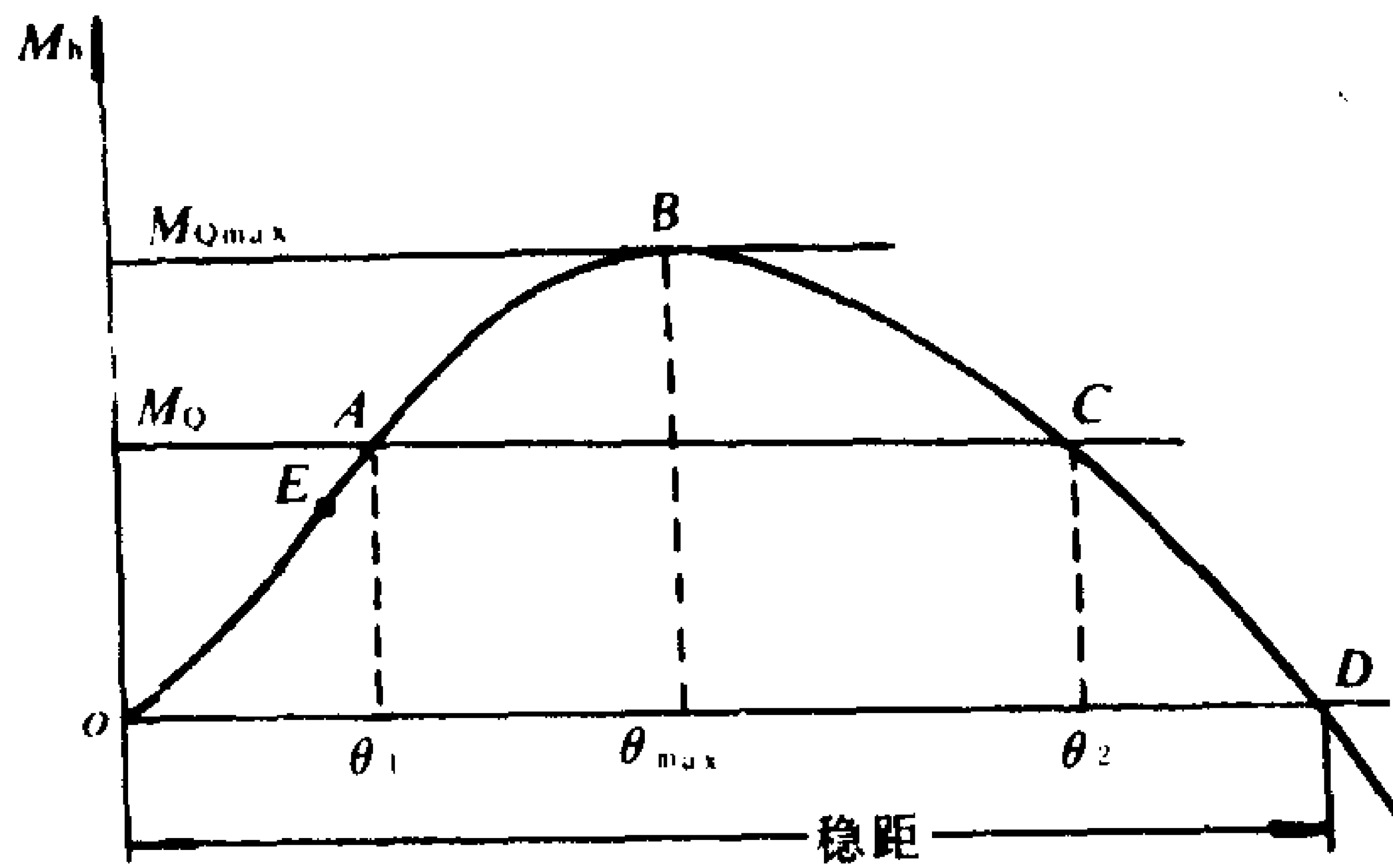


图 1.2.4-23 稳定平衡与不稳定平衡

船在外力矩静力作用下一般有两个平衡位置，M_θ与稳性曲线上升段交点A相对应的横倾角θ_1是稳定平衡位置，而与下降段交点C相对应的横倾角θ_2是不稳定平衡位置。

4.2.4 消失角和稳距

在静稳性曲线上的D点，其回复力矩$M_h = 0$，与之相对应的横倾角为消失角。OD之间的距离称为稳距，表示船舶在该段范围内是具有回复力矩的。当横倾角超过消失角后，船的回复力矩变为负值，其作用使船舶继续倾斜直至倾覆。消失角也是表示船舶稳性好坏的标志之一，《海船稳性规范》规定，船舶的消失角应不小于 55°。

4.3 静稳性交叉曲线及其应用

静稳性交叉曲线是一组曲线，它表示了排水体积V、倾斜角θ与形状稳性力臂l_θ等参数之间的数量关系。交叉曲线有多种表示方法，使用较多的是等倾角曲线族，如图 1.2.4-20 所示，即以V为横坐标，$\overline{KN}$为纵坐标，画出等倾角曲线。有了交叉曲线，只要根据实际装载情况下的排水量V，在交叉曲线上量取V，在V处作一直线平行于纵坐标轴，得到该直线与等倾斜

曲线族的交点，然后可以作出静稳性曲线。

计算实例：

已知：船舶排水体积 $V=16000\ m^3$，重心距基线高 $\overline{KG}=7.8\ m$；稳性交叉曲线，如图1.2.4-24所示。求其静稳性曲线。

解：（1）根据 $V=16000\ m^3$，从图 1.2.4-24 量得各横倾角时的 $\overline{KN}$ 值，填入表 1.2.4-8 第一行；

（2）将各横倾角的 $\sin\theta$ 值填入第二行；

（3）将 $\overline{KG}\sin\theta$ 填入第三行；

（4）将第一行减去第三行得第四行；

（5）根据第四行各 $\overline{GZ}$ 值，绘制图 1.2.4-25 的静稳性曲线。

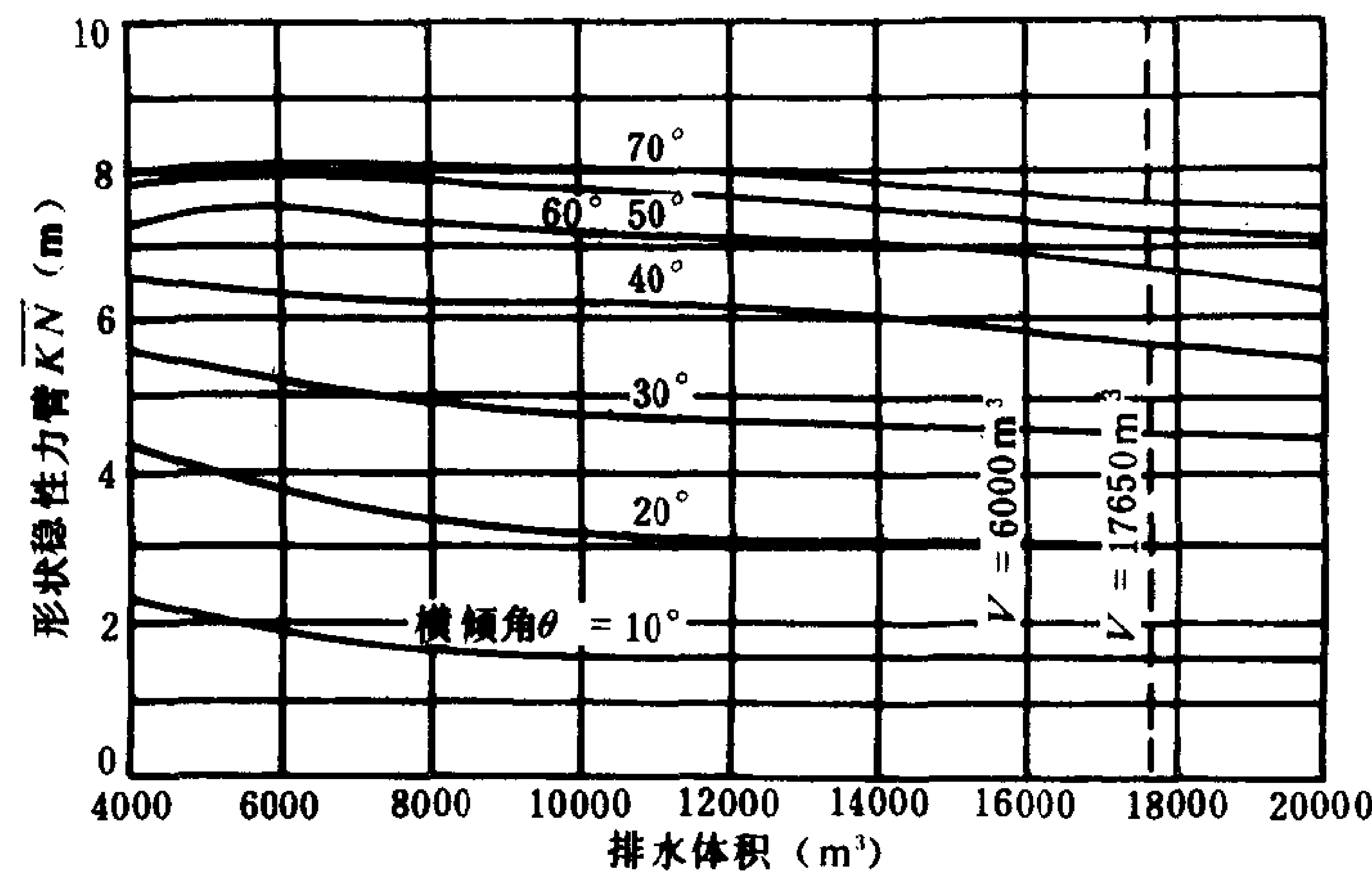


图 1.2.4-24　基点稳性交叉曲线

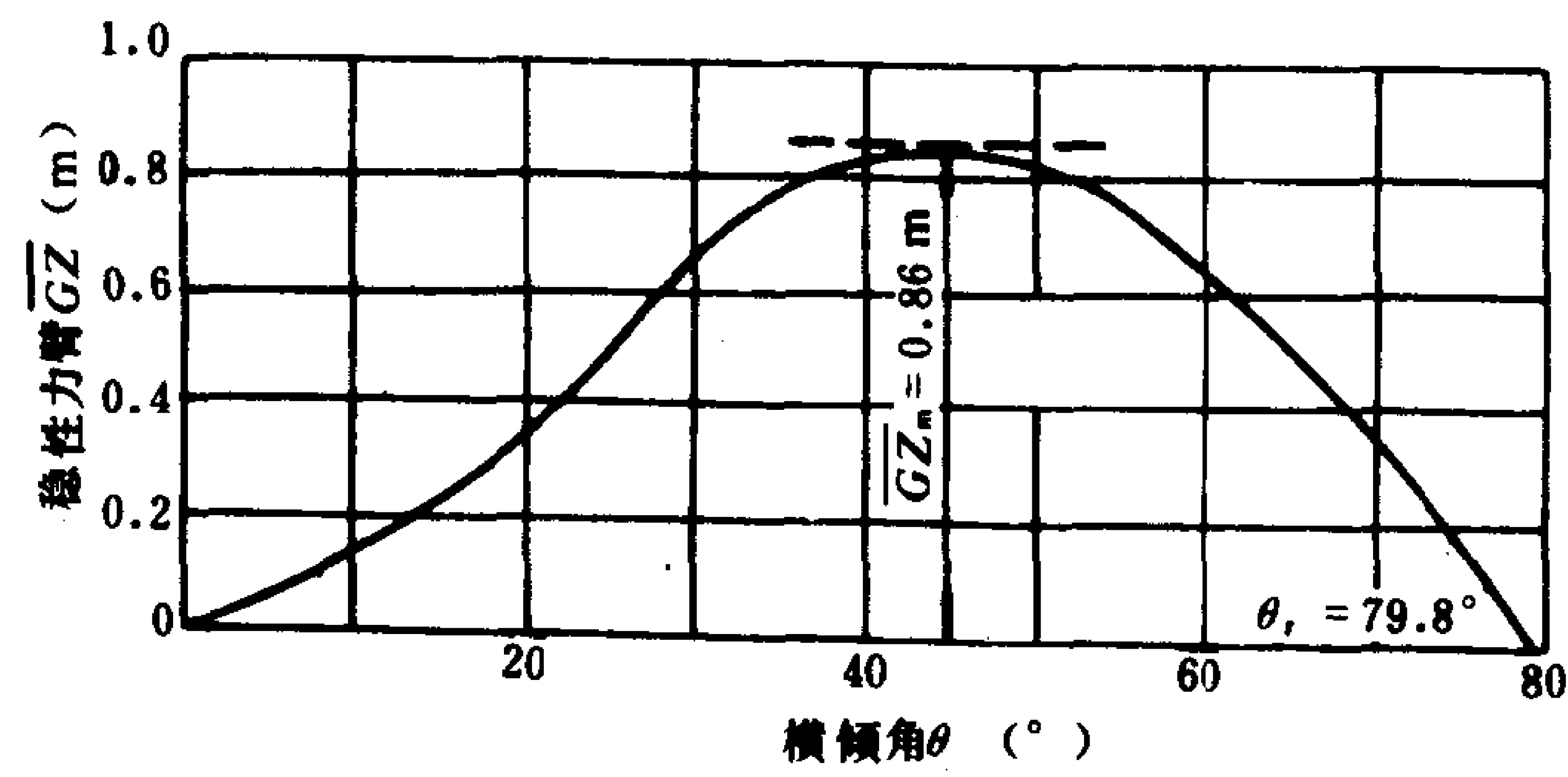


图 1.2.4-25　静稳性曲线重绘

表 1.2.4-8　静稳性曲线计算

序号	横倾角θ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
一	$\overline{KN}$ (m)	0	1.49	3.02	4.55	5.85	6.80	7.40	7.69
二	$\sin\theta$	0	0.174	0.342	0.500	0.643	0.766	0.866	0.940
三	$\overline{KH}=\overline{KG}\sin\theta$ (m)	0	1.36	2.67	3.90	5.02	5.97	6.75	7.33
四	$\overline{GZ}=\overline{KN}-\overline{KH}$ (m)	0	0.13	0.35	0.65	0.83	0.83	0.65	0.36

4.4 动稳性

4.4.1 静倾角

一个缓慢增加的横倾力矩逐渐作用于船上，使船缓慢地产生横倾，其角速度可忽略不计。假定此横倾力矩的终值为M_Q，则当船舶倾斜至某一角度时，其回复力矩M_h与横倾力矩M_Q相等，于是船就不再继续倾斜而达到平衡状态。这种性质的外力矩称为静力作用，由此而产生的横倾角称为静倾角。在静稳性曲线图上画一M_Q的水平直线，此直线与回复力矩M_h曲线的交点即可求出静倾角，如图 1.2.4-22 中的θ_1。船上横向移动重物或在船的一侧装卸小量货物等情况，都可以看作是外力矩的静力作用。

4.4.2 动倾角

船舶在海上航行时经常受到外力矩M_Q的突然作用，例如阵风的突然袭击，海浪的猛烈冲击等。船舶在受到外力矩M_Q的突然作用下产生倾斜，具有一定的不可忽略的角速度，这种情况与静力作用大不相同，即使倾斜到某一角度，已达到了$M_h=M_Q$，船舶仍然继续倾斜，直到θ_d如图 1.2.4-26 所示时才开始回复运动。此θ_d即称为动倾角。动倾角θ_d较静倾角θ_1大很多。这种性质的外力矩称为动力作用。在外力矩的动力作用下，船舶倾斜时具有一定的角速度，只有当外力矩M_Q所作的功完全由回复力矩M_h的功抵消时，船的角速度才变为零而停止倾斜。据此，可以求得动倾角θ_d。如图中面积$OEDC$=面积$OABC$表示倾斜力矩所作的功等于回复力矩的功，由于面积$OADC$为两者所共有，故面积OEA=面积ABD(图中阴影线部分)，D点所对应的倾角即为动倾角θ_d。

4.4.3 动稳性曲线

当船舶横倾至θ时，回复力矩M_h所作的功T_h是：

$$T_h=\int_0^{\theta} M_h d\theta = D\int_0^{\theta} l d\theta$$

或

$$T_h=Dl_d$$

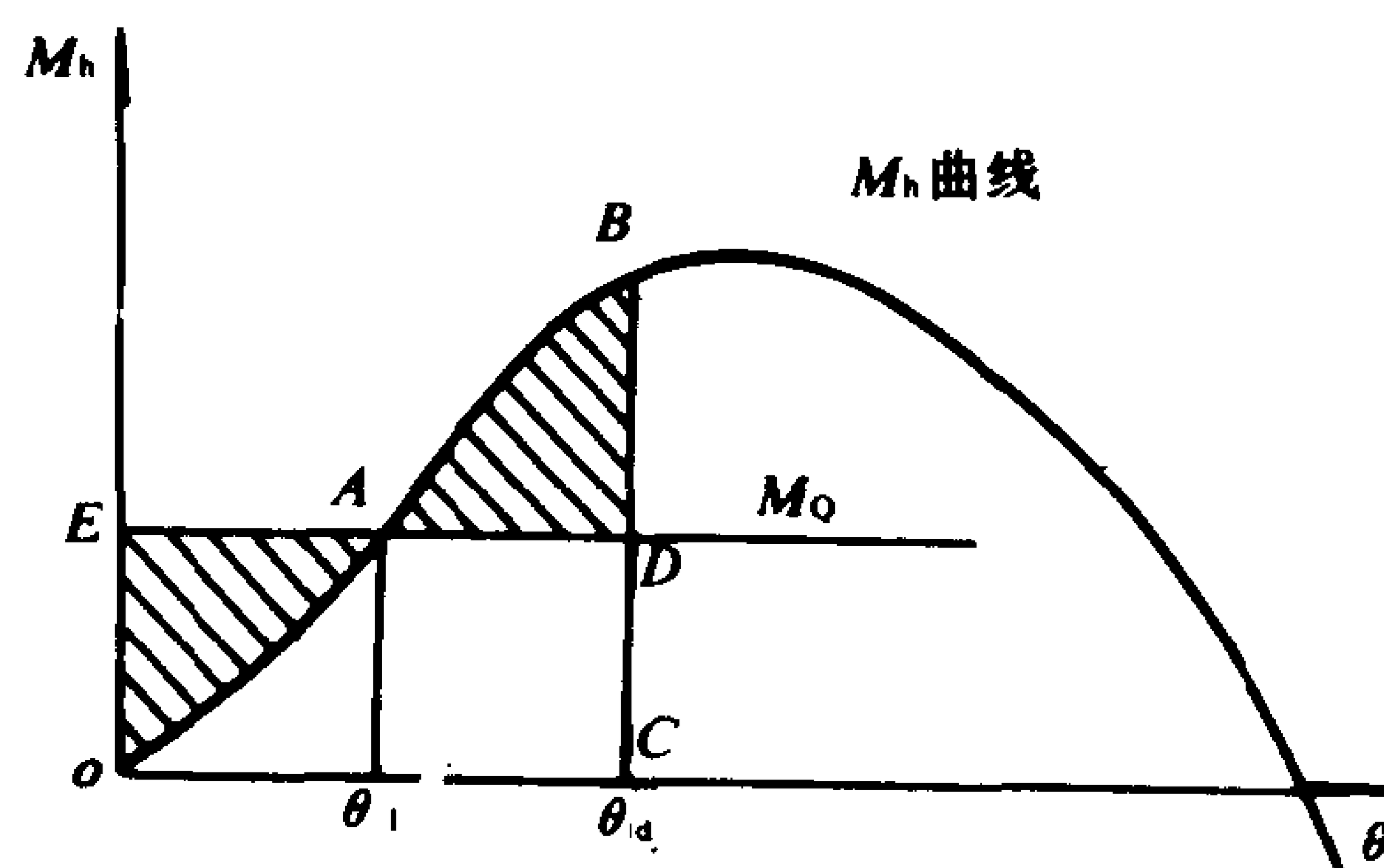


图 1.2.4-26 静倾角与动倾角

其中，$l_d=\int_0^{\theta} l d\theta$称为动稳性臂；$T_h$或$l_d$随$\theta$而变化的曲线，称为动稳性曲线，因此，动稳性曲线是静稳性曲线的积分曲线。有了静稳性曲线（M_h或l），就可以用近似计算法求出动稳性曲线（T_h或l_d），如图 1.2.4-27 中b) 所示。静稳性曲线和动稳性曲线之间有下列关系：

（1）在$\theta=0$处，静稳性臂$l=0$，动稳性臂l_d也等于 0 。

（2）当θ等于极限静倾角θ_{max}时，静稳性臂达最大值l_{max}，在动稳性臂l_d曲线上表现为反曲点A'。

（3）当θ等于消失角时，$l=0$，动稳性臂l_d达最大值l_{dmax}。

（4）动稳性曲线在某一倾角处的纵坐标代表静稳性曲线至该处所围的面积，例如在图 1.2.4-27中，动稳性曲线的纵坐标$A'C'$代表静稳性曲线图的面积OAC。动稳性曲线的纵坐标$D'B'$代表静稳性曲线图的面积OAB。

表 1.2.4-9 是根据静稳性曲线$l=f(\theta)$ 用梯形法计算动稳性曲线的一个实际例子。

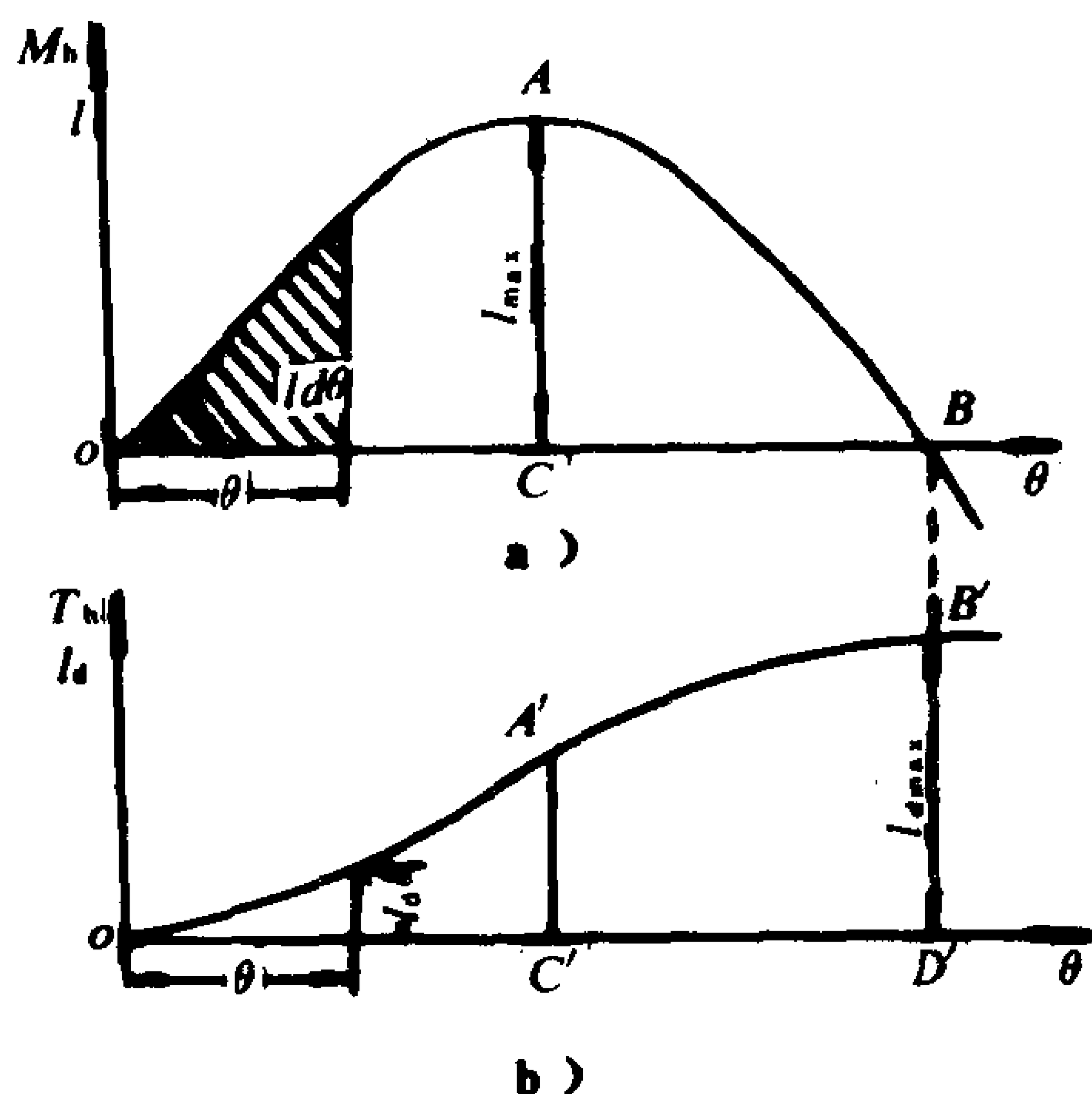


图 1.2.4-27 动稳性曲线

表 1.2.4-9 动稳性臂计算表

横倾角 θ	静稳性臂 l (m)	成对和	自上至下之和 Σ_l	动稳性臂 $l_d=\frac{1}{2}\Delta\theta\times\Sigma_l$(m)
0	0	0	0	0
10	0.122	0.122	0.122	0.011
20	0.343	0.465	0.587	0.051
30	0.598	0.941	1.528	0.132
40	0.735	1.333	2.861	0.250
50	0.680	1.415	4.276	0.373
60	0.505	1.185	5.461	0.477
70	0.251	0.756	6.217	0.543
80	−0.040	0.211	6.428	0.545

（$\Delta\theta=10^\circ=0.1746$ 弧度，$\frac{1}{2}\Delta\theta=0.0873$）

4.4.4 动稳性曲线的应用

利用动稳性曲线可以较方便地求得在不变动倾力矩作用下船舶产生的动倾角和极限倾覆力矩。

1)初始位置为正直时

如图 1.2.4-28 a)所示，设有一个横倾力矩M_Q突然作用在船上(其横倾力臂为 $l_Q=M_Q/D$)，可在静稳性曲线图上作一直线，使面积OAB=面积BCD，便可求得动倾角θ_d。但是借移动直线CD以凑得两个面积相等较为困难。故通常应用动稳性曲线来求θ_d。在图 1.2.4-28 b)的横坐标上$\theta=57.3^\circ$处，垂直量取M_Q(或l_Q)，得N点，连接ON，则直线ON即为T_Q（或l_{dQ}）随Q而变化的规律，T_Q（或l_{dQ}）与T_h（或l_d）两曲线的交点C'表示横倾力矩M_Q所作的功与回复力矩M_h所作的功相等。因此，与C'点相对应的倾角即θ_d。

在图 1.2.4-28 a) 中，作一水平直线并使面积OFG=面积GHK，则此水平线所表示的外力矩即为极限倾覆力矩M_{Qmax}，与K点相对应的倾角即为极限动倾角θ_{dmax}。在图 1.2.4-24 b) 中，作与动稳性曲线相切的直线OK'，则此直线表示极限倾覆力矩M_{Qmax}所作的功，与切

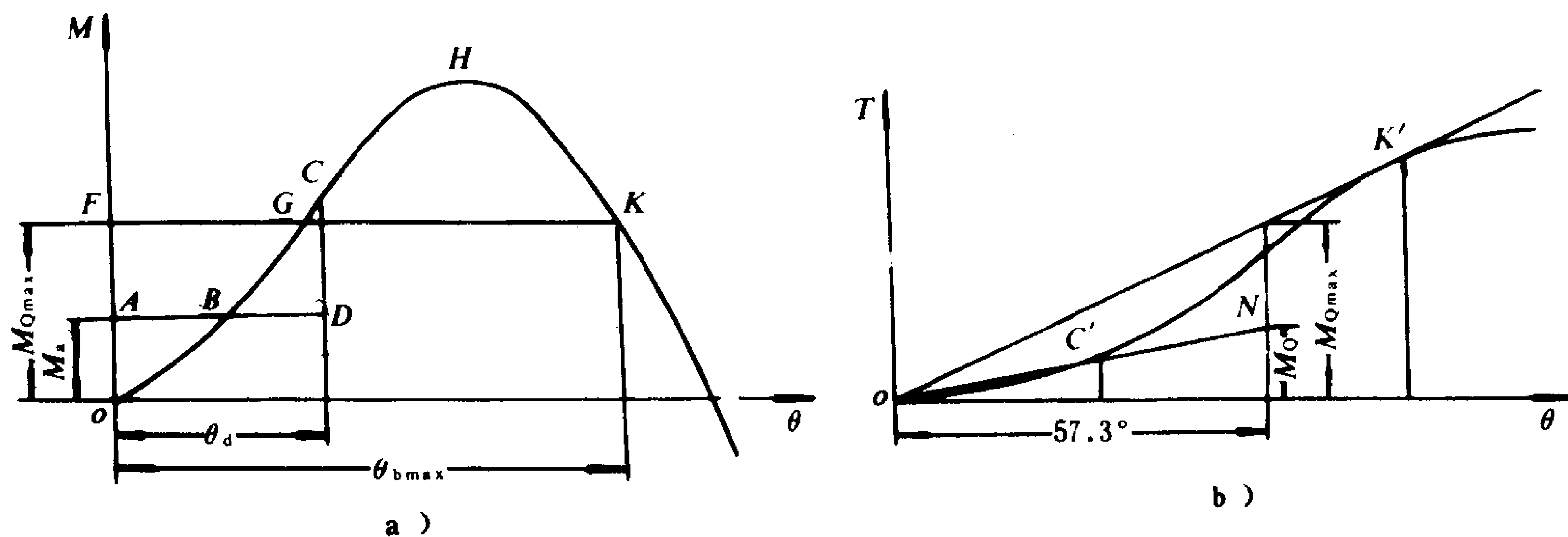


图 1.2.4-28　初始位置为正直时求θ_d和M_{Qmax}

点K'相对应的横倾角即为极限动倾角θ_{dmax} OK'直线在$\theta=57.3°$处的纵坐标，便是极限倾覆力矩M_{Qmax}（或倾覆力臂l_{Qmax}）。如果突然作用在船上的横倾力矩大于M_{Qmax}，则表示该力矩所作的功的直线不再与动稳性曲线相交或相切，这就意味着在动力作用情况下，船舶已经不能抵抗这样大的横倾力矩。因此，船舶必然倾覆。

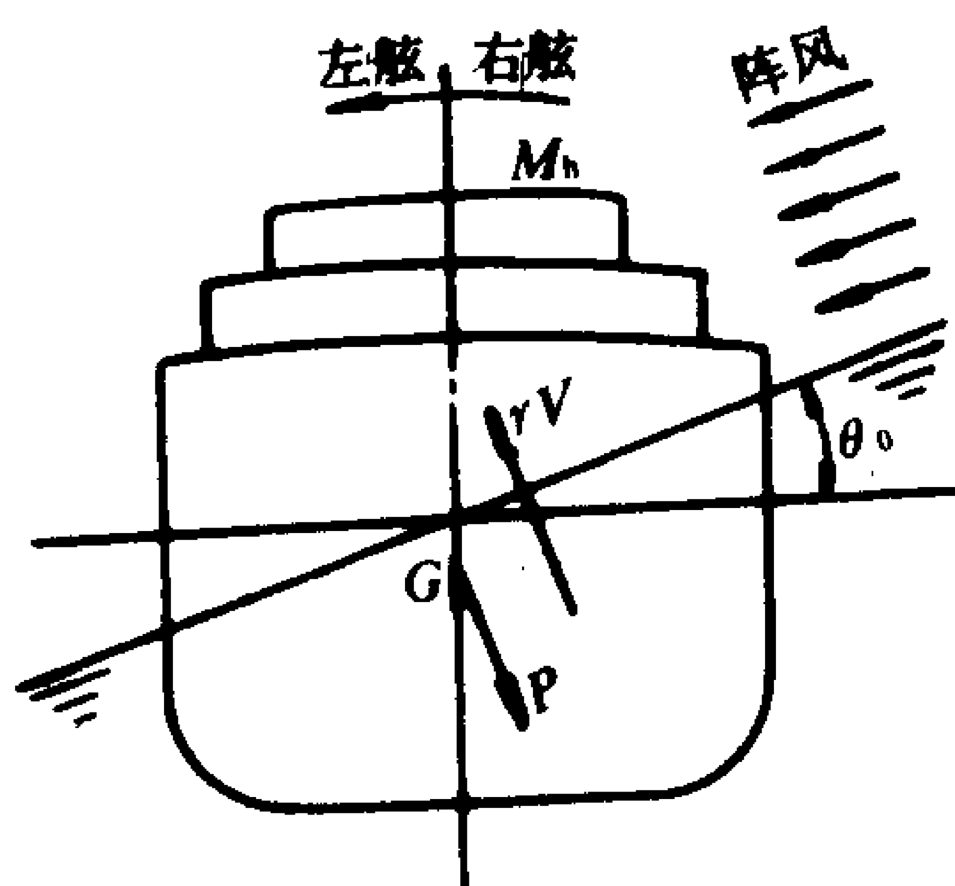


图 1.2.4-29　横摇至θ_0受突风作用

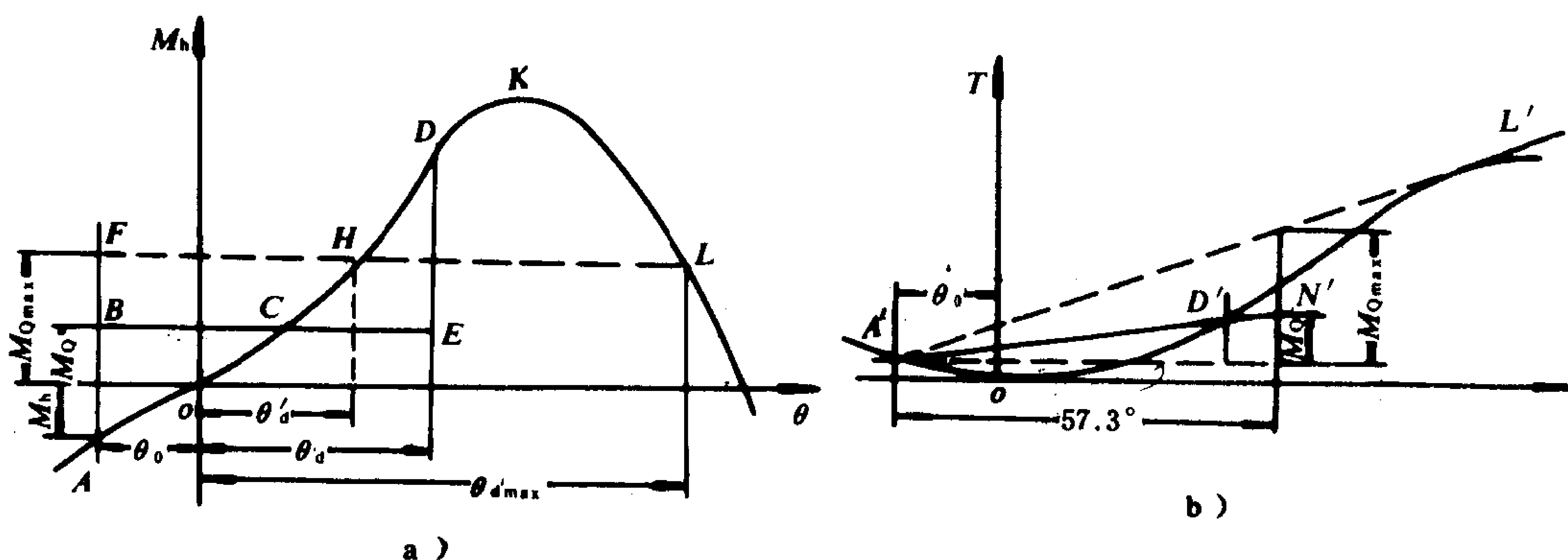


图 1.2.4-30　初始位置为倾斜时求θ_d和M_{Qmax}

a)用静稳性曲线求；b)用动稳性曲线求

2）初始位置为倾斜时

船舶在航行中受到风浪的作用后产生摇摆运动。如图 1.2.4-29 所示，当船向右舷横摇至最大摆幅θ_0时，又突然受到来自右舷的阵风吹袭，此种情况最危险。因为这时有两个力矩促使船舶向左舷倾斜，一是船的回复力矩$M_h = D \cdot l$；二是阵风吹袭的外倾力矩M_Q，这时总的倾斜力矩是：$M_Q' = M_h + M_Q$。由于M_h是随倾角θ而变化的，因此需要把静稳性曲线向相反的方向对称延长，如图 1.2.4-30 a）所示，其动稳性曲线则从OT轴对称延伸，如图 1.2.4-30 b）所示。在静稳性曲线图上，A点对应于向右舷的最大摆幅θ_0。船舶受到总力矩M'_Q作用后向左舷倾斜，只有当面积ABC=面积CDE时，船才停止倾侧，与D点对应的倾角即为动倾角θ_d。从图中还可看出，如果船在正浮时受到阵风吹袭，则其动倾角θ_d'较θ_d要小得多。

在动稳性曲线图上，从A'点（对应的倾角为最大摆幅θ_0）引斜线$A'N'$，其斜率为M_Q，并与动稳性曲线相交于D'点，则D'点所对应的倾角即为动倾角θ_d。

在静稳性曲线图上，引一水平线，使面积AFH=面积HKL，则此水平线所代表的外力矩即为极限倾复力矩M_{Qmax}，与L点相对应的倾角即为极限动倾角θ_{dmax}。在动稳性曲线上，从A'点作与动稳性曲线相切的斜线$A'L'$，其斜率即为极限倾复力矩M_{Qmax}，与切点L'相对应的倾角便是极限动倾角θ_{dmax}。

前面在 4.2.2、4.4.4.1、4.4.4.2 三处提到三个极限倾覆力矩M_{Qmax}，即：在静力作用下的极限倾覆力矩M_{I}。船舶正浮时在动力作用下的极限倾覆力矩M_{II}。船舶横摇至最大摆幅θ_0时又受到阵风动力作用的极限倾覆力矩M_{III}，如图 1.2.4-31 所示。从图中可以看出：$M_{\mathrm{I}} > M_{\mathrm{II}} >$

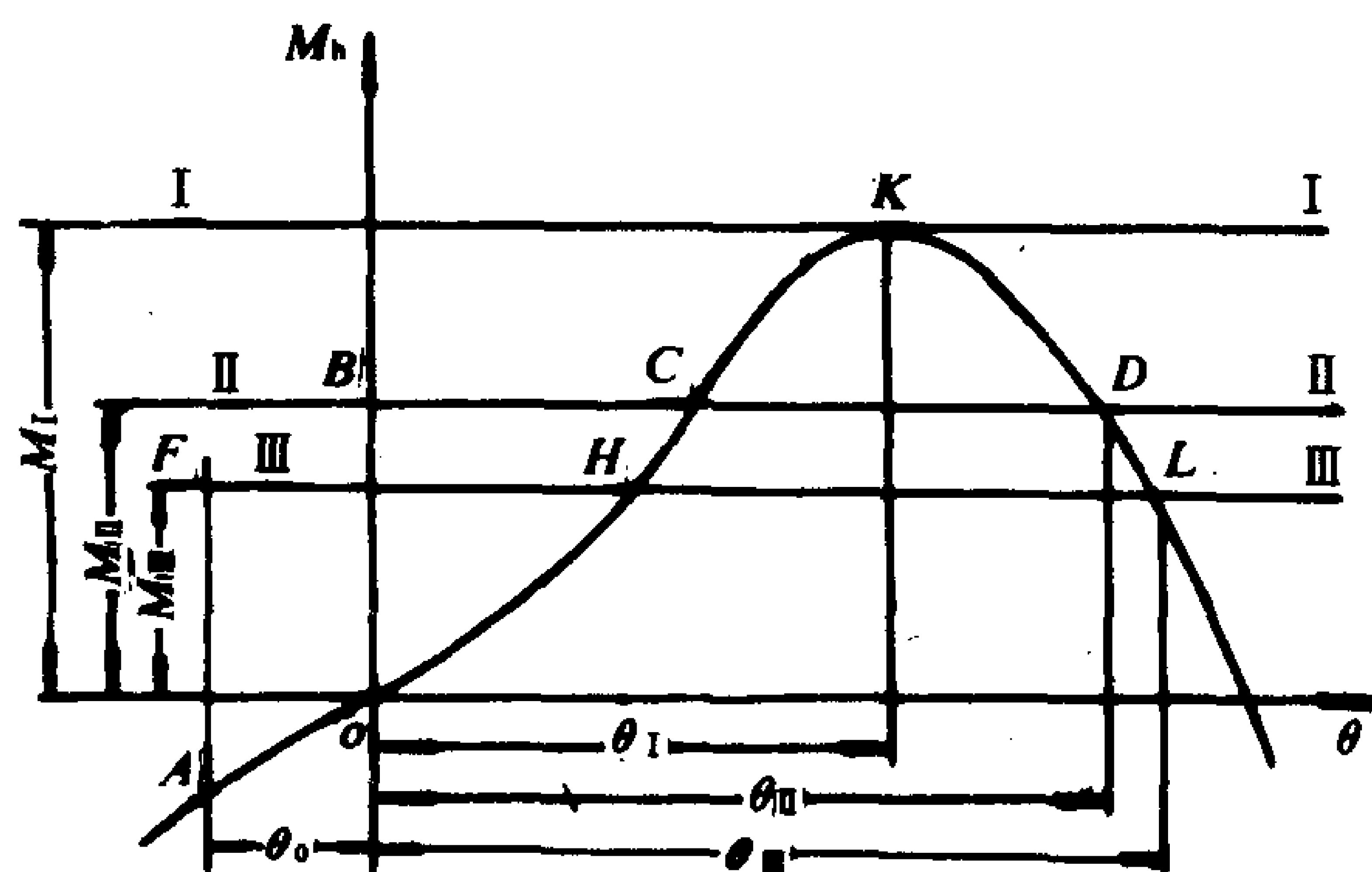


图 1.2.4-31　最小倾覆力矩

M_{III}，而$\theta_{\mathrm{I}} < \theta_{\mathrm{II}} < \theta_{\mathrm{III}}$。这表明船舶横摇至最大摆幅$\theta_0$时，能抵抗动力作用下外力矩的极限能力最小。因此，$M_{\mathrm{III}}$称为最小倾覆力矩，通常以符号$M_q$来表示，$l_q = M_q / D$称为最小倾覆力臂，对于船舶稳性说来，这是最危险的情况。为了保证航海安全，《海船稳性规范》规定，应把最危险的情况作为衡量海船稳性的标准，亦即以最小倾覆力矩M_q来判断船舶是否具有足够的稳性。具体校核方法详见 4.5。

4.4.5　稳性曲线的有效范围

当船舶倾斜时，如果水面到达某一开口，海水将灌入船身主体内部，使船舶处于危险状态。因此，当倾斜水线到达该开口处，即认为船舶丧失稳性。故在稳性校核时，要计算水线到达最先进水的那个非水密处的倾斜角度θ_j，θ_j称为进水角。

设船舶在某一排水量时的稳性曲线，如图 1.2.4-28 所示。根据排水体积在图1.2.4-33（此图由设计部门提供）中查出进水角θ_j，并把它画在图 1.2.4-32 上。按照《海船稳性规范》规定：稳性曲线的有效部分至进水角θ_j处为止，并应根据有效部分来决定最小倾覆力矩M_q（或最小倾覆力臂l_q）。

4.5 船舶在各种装载情况下的稳性校核

1）《海船稳性规范》中规定，船舶在各种装载情况下，经自由液面修正后的初稳心高度和静稳性曲线应满足下列要求：

（1）初稳心高度h应不小于 0.15 m。

（2）I 类航区船舶的最大静稳性臂l_{max}应不小于 0.2 m；对于II、III类航区的船舶说来，当$L \geq 40$ m时，l_{max}应不小于 0.2 m；当$L \leq 20$ m时，l_{max}应不小于 0.15 m；当 $20 \leq L \leq 40$ 时，l_{max}应不小于按内插法所得的数值。

（3）最大静稳性臂l_{max}所对应的横倾角（即极限静倾角）应不小于 30°。

（4）当船体的进水角小于极限静倾角时，则进水角所对应的静稳性臂应不小于（2）中对最大静稳性臂所规定的数值。

（5）静稳性曲线的消失角应不小于 55°

2）海船稳性《规范》提出：海船稳性的基本衡准数k应大于（或至少等于） 1。k为最小倾覆力矩M_q（或力臂l_q）与风压倾侧力矩M_f（或力臂l_f）的比值，即

$$k = M_q / M_f \geq 1 \qquad 或 k = l_q / l_f \geq 1$$

式中，最小倾覆力矩M_q表示船舶在最危险情况下能抵抗外力矩的极限能力。M_f表示在恶劣海况下风对船的动倾力矩。$k \geq 1$表示船舶在严重情况下还不致于倾覆，因而认为具有足够的稳性。M_q（或l_q）及M_f（或l_f）的计算方法如下：

（1）最小倾覆力矩M_q（或力臂l_q）的计算

M_q（或l_q）的确定方法已在 4.4.4 的 2）中介绍过，这里只对θ_0的计算予以说明。

最大横摇角θ_0可根据船舶的自摇周期 T_θ 及航区等情况来决定。

①船舶的自摇周期T_θ

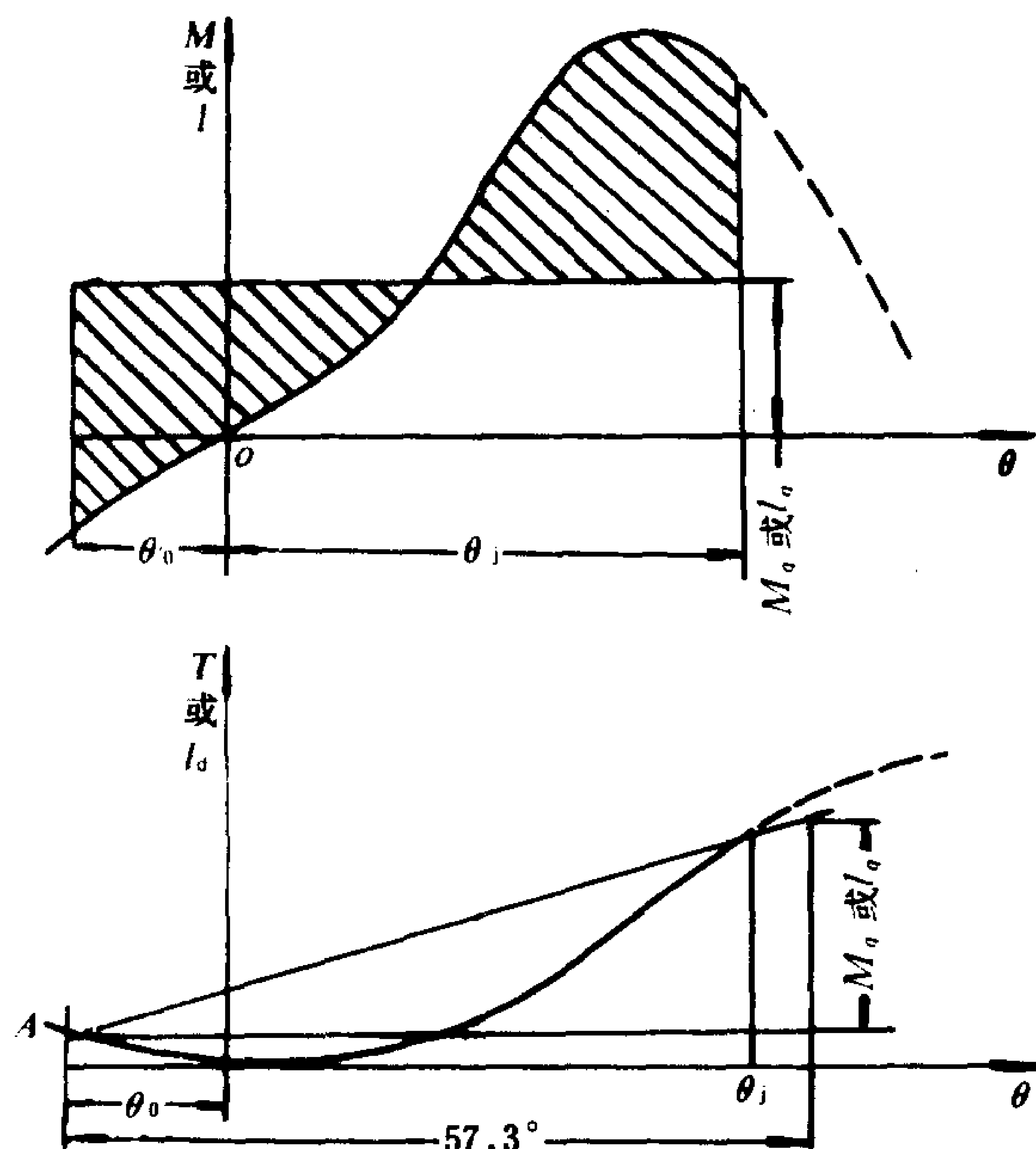


图 1.2.4-32 稳性曲线的有效范围

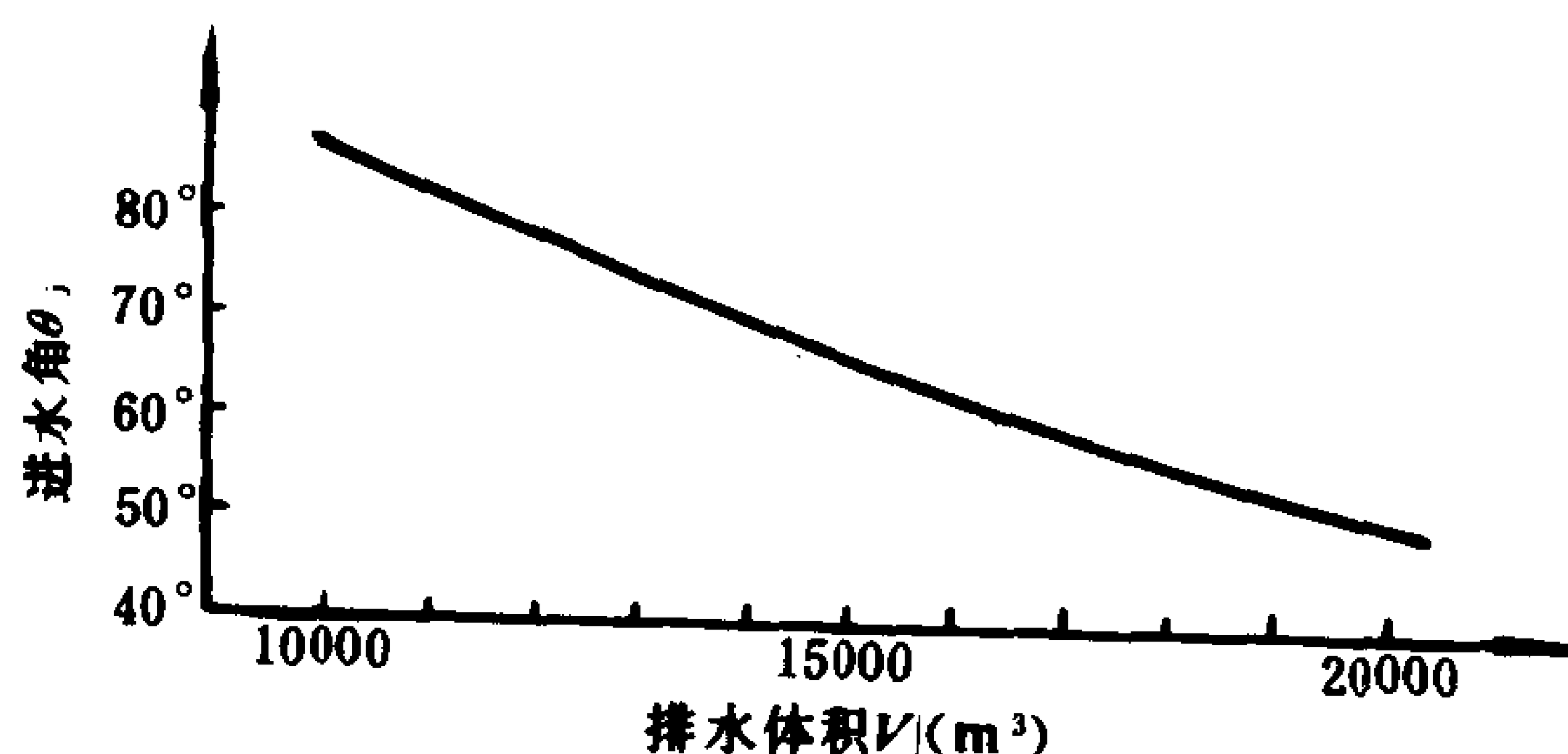


图 1.2.4-33 进水角曲线

$$T_\theta = 0.58\sqrt{\frac{B^2 + 4Z_g^2}{h_0}} \quad (1.2.4\text{-}56)$$

式中：h_0——未计及自由液面修正的初稳心高度，m。

②对于有舭龙骨的圆舭形船舶横摇角 θ_0

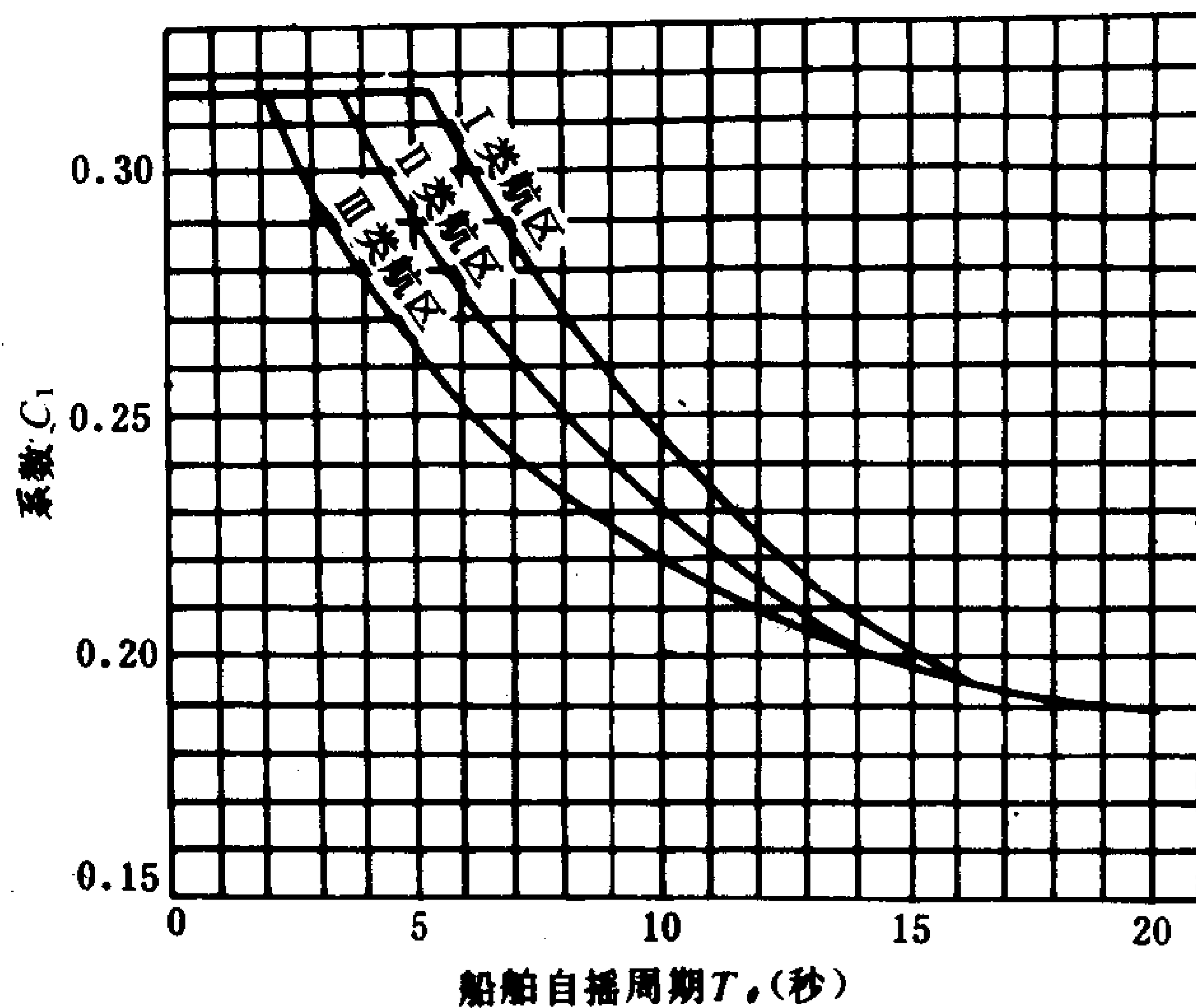


图 1.2.4-34 C_1系数

$$\theta_0 = 87.5c_1c_2c_3\sqrt{0.216 + \frac{Z_g}{d}} \quad (度) \quad (1.2.4\text{-}57)$$

式中，$Z_g/d > 1.45$时，应取1.45，而当$Z_g/d < 0.917$时，应取0.917。

c_1根据T_θ及航区由图1.2.4-34中查得。当$T_\theta > 20$秒时，c_1取0.19。

c_2按船舶类型及舭龙骨尺寸由表1.2.4-10查得。

c_3按船舶的$\frac{B}{d}$值由表1.2.4-11查得。

按上述方法求出横摇角θ_0后，便可在稳性曲线上确定最小倾覆力矩M_q（或力臂l_q）。

（2）风压倾侧力矩M_f（或力臂l_f）的计算。

表 1.2.4-10 c_2 系 数

$\frac{A_b}{LB}$(%)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0及4.0以上
货船、油船	0.85	0.80	0.75	0.71	0.68	0.68	0.68
客船、渔船、拖船	1.00	0.92	0.85	0.80	0.75	0.71	0.68

注：表中A_b为舭龙骨总面积（米）²，L为垂线间长（米），B为型宽（米）；
对于有方龙骨的船舶，可将其侧面积计入舭龙骨面积A_b之内。

表 1.2.4-11 C_3 系 数

B/d	2.5及以下	3.0	3.5	4.0及4.0以上
c_3	1.00	0.90	0.85	0.80

注：对于无舭龙骨的船舶，或有舭龙骨但$\frac{A_b}{LB}$小于1%的圆舭形船舶以及其他特殊线型的船舶，目前还没有计算其系数c_2、c_3的方法。因此，这类船舶的c_2及c_3数值应经验船部门同意后选用。

$$M_f = PAZ \quad (1.2.4\text{-}58)$$

或

$$l_f = M_f/D$$

式中：A——船体受风面积，即船体水线以上部分的侧投影面积，m²；

Z——受风面积中心至水线的距离，m；

P——单位计算风压，可从图1.2.4-35中查得，Pa。

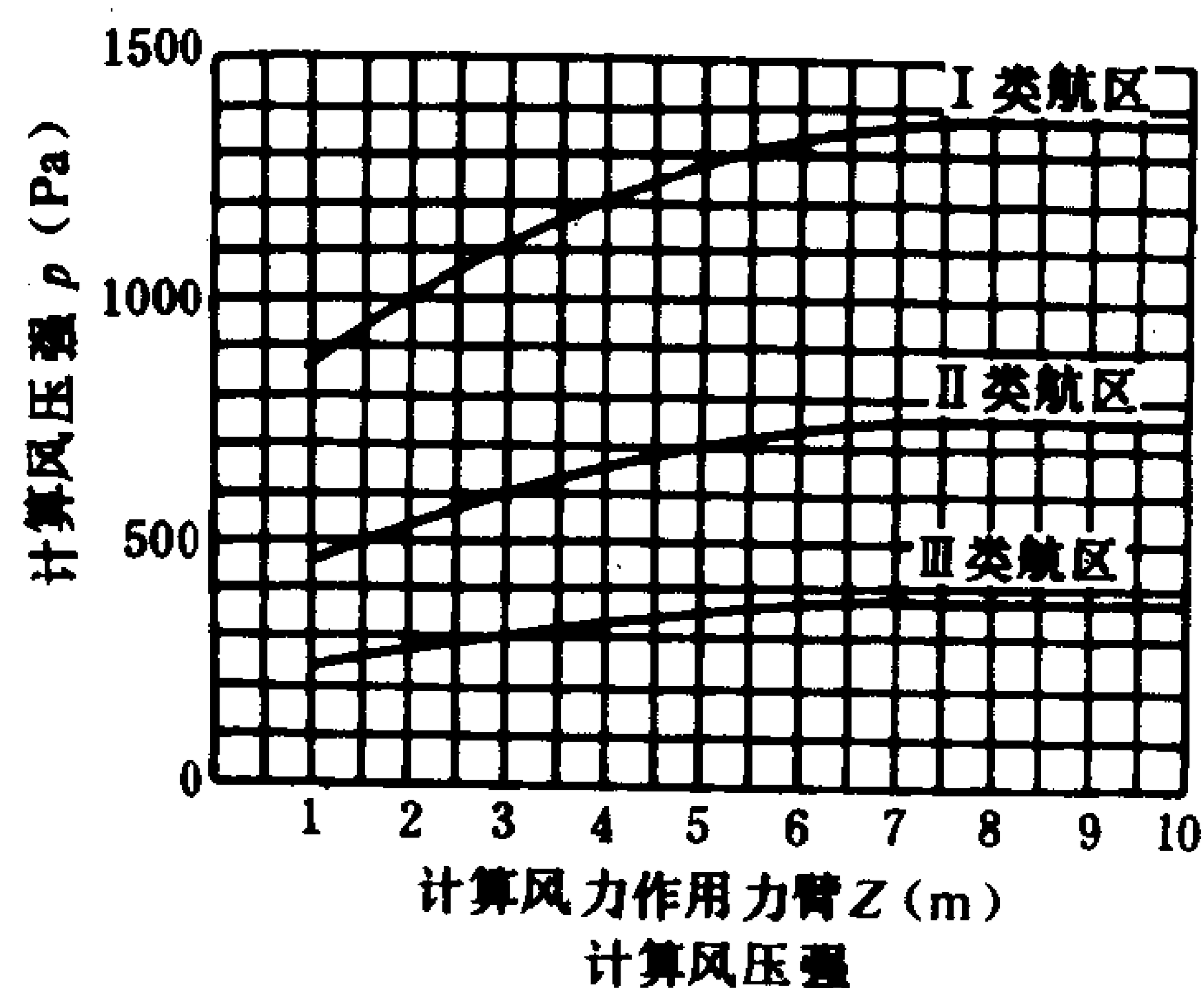


图 1.2.4-35 单位计算风压

根据以上所得的风压倾侧力矩M_f（或力臂l_f）即可算出稳性基本衡准数k，如$k \geq 1$，则表明船舶具有足够的稳性。

4.6 极限重心高度曲线

为了便于管理人员掌握船舶的稳性情况，设计人员还应提供极限重心高度曲线。

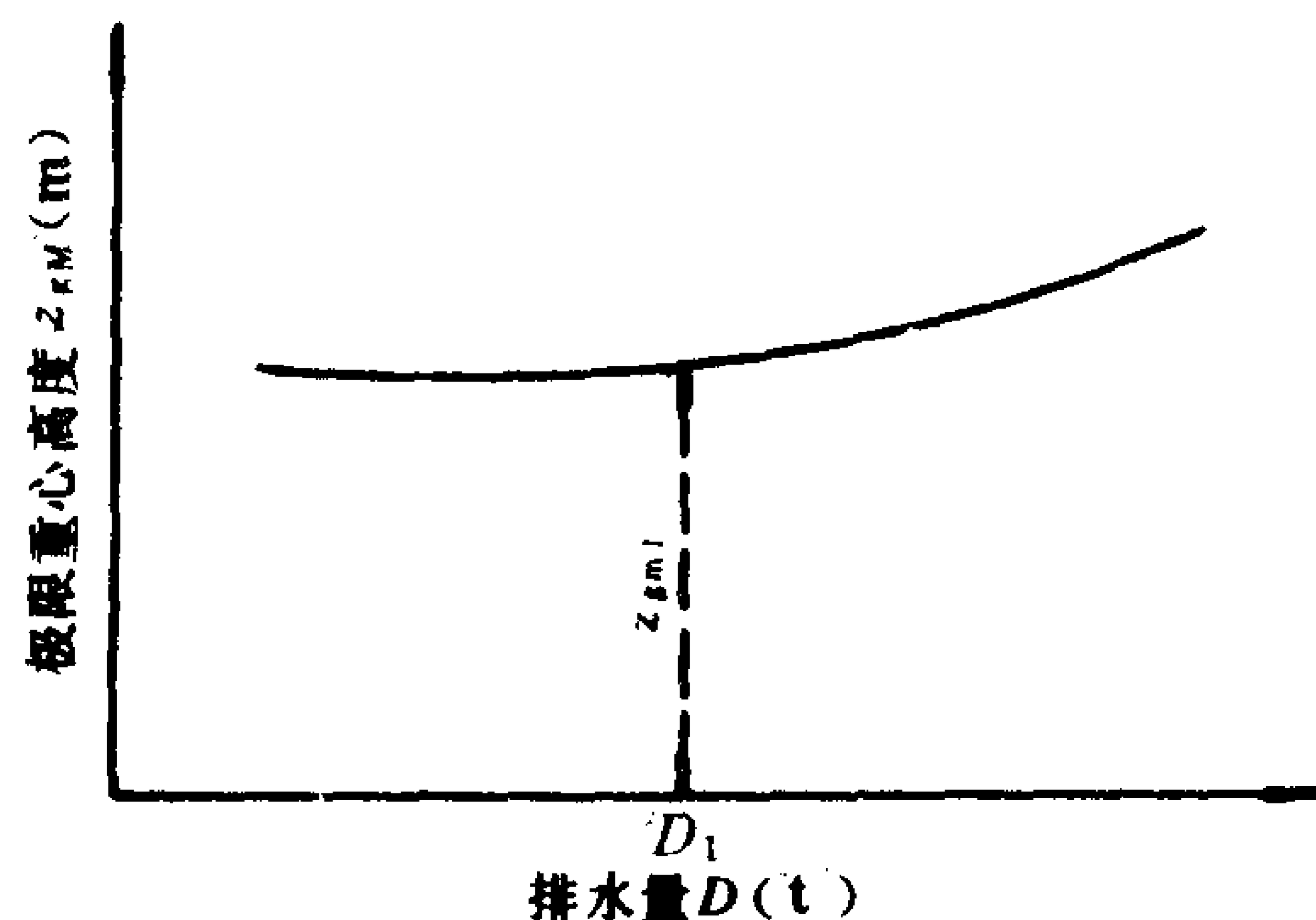


图 1.2.4-36 极限重心高度曲线

极限重心高度，是指船舶恰能满足稳性要求的重心高度。船舶在营运中的重心高度不可超过此极限数值。船舶在各种排水量时，都有相应的极限重心高度。由于《海船稳性规范》对船舶稳性有如 4.5 节所述的 5 项要求，对于每项要求都有其相应的极限重心高度。计算出船舶在同一排水量时的五个极限重心高度数值，其中最小的那个数值即为船舶恰能满足稳性要求时的重心高度。取若干不同排水量作类似计算，便可求得船舶在不同排水量时的极限重心高度，即可绘出如图 1.2.4-36 所示的极限重心高度曲线。图中的横坐标为排水量$D(t)$，纵坐标为极限重心高度Z_{gM}(m)。从图中可以看出，船舶在排水量D_1时的极限重心高度为Z_{gM1}。若船舶在该排水量时的实际重心高Z_g较Z_{gM1}为低（即$Z_g < Z_{gM1}$），则船舶的稳性是足够的。否则，船舶的稳性不足。

4.7 检查和保持稳性的措施

（1）严格遵守船舶载重规定。

（2）严格按规定消耗和装载液体载荷，防止自由液面过大。

（3）将所有移动载荷放置在设计书规定的地点，并按航行要求将其固定好。

（4）装载物资时，首先应装在底甲板和平台甲板上，然后装在上甲板上，两舷要放置均匀；卸载时，按相反顺序进行。

（5）装卸物资时，避免船舷朝向风浪。

（6）敲碎甲板、圆材和索具上的冰块，将其抛出舷外。

（7）防止柜内的液体载荷从一舷流到另一舷。

（8）迅速查明产生横倾和纵倾的原因，并立即排除。

（9）不允许底舱、甲板、平台、尤其是船舶重心以上的大舱里有积水。

(10)堵漏后立即用固定的和移动式排水器材排出破损舱室的水。

(11)停靠码头时，不允许船底接触海底，要注意查看系缆情况。

(12)船舶稳性数据的变化情况应记在抗沉标板上和相应的文件中。应该记载的有：船舶吃水和纵倾、排水量、液体载荷的数量。停泊时每天测量一次，航行中每 4 小时测量一次。

5 抗沉性

5.1 对船舶抗沉性要求和保证

5.1.1 船舶抗沉性

船舶不沉性是指船舶在一舱或数舱破损进水后保证不沉、不翻的固有能力。船舶抗沉性包括船舶不沉性和为保障不沉性而采取的各种防沉、抗沉措施。但在民用船舶中，二者不分，

称为抗沉性。

5.1.2　抗沉性要求

《海船抗沉性规范》中规定：民船当一舱或数舱进水后，至少应有76 mm的干舷，并应有一定的稳性。在进水终了剩余初稳心高度：客船不小于0.05 m；其他船舶必须为正值。非对称进水的最大横倾角：客船不得超过15°；其他船舶不超过20°。扶正终了客船的横倾角不超过7°，其他船的横倾角不超过12°。对军舰的抗沉性要比民船高得多。

5.1.3　船舶抗沉性的保证

船舶抗沉性从三个方面来保证：在船舶设计和建造过程中的结构措施；在船舶整个营运期间所实施的组织技术措施；在船舶破损后船员为抗沉性所作的斗争。

1)保证船舶抗沉性的结构措施

（1）给船舶增加浮力贮备、稳性贮备及强度贮备；

（2）用横舱壁及纵舱壁、甲板和平台对船舶进行分舱，限制当船舶破损时浮力贮备和稳性贮备的损失；

（3）保证船舶结构的水密性和强度；

（4）配备保证船舶抗沉性的专用系统和工具，以及附设保证为船舶抗沉性而斗争和检验稳性的仪表及资料。

2)保证抗沉性的主要组织技术措施

（1）正确地组织船员保证抗沉性；

（2）按照为抗沉性而斗争的有关一切活动，对船员进行系统且严格的训练；

（3）保持船舶的水密性和保持必需的储备浮力；

（4）保持合理装卸载荷，保持良好的稳性；

（5）保持抗沉设备处于随时可用状态。

3)为船舶抗沉性而斗争

（1）发现破损进水的位置；

（2）确定破损区域的范围；

（3）限制水的蔓延（堵漏、支撑、排水）；

（4）平衡船舶。

关于保证船舶抗沉性的一些主要措施，列在对所有船舶都适用的“船舶损害管制系例”中，以及列在只适用于某一船舶的抗沉性技术文件中。

5.2　破损进水对浮态和稳性的影响

5.2.1　抗沉计算的两种基本方法

船舶破损进水后，如进水量不超过排水量的10～15%，则可应用初稳心公式来计算船舶进水后的浮态和稳性，计算的基本方法有二。

1)增加重量法

把破舱后进入船内的水看成是增加的液体载荷。

2)损失浮力法

把破舱后的进水区域看成是不属于船的，即该部分的浮力已经损失，损失的浮力借增加吃水来补偿。这样，对于整个船舶来说，其排水量和重心位置保持不变。

用上述两种方法计算所得的最后结果，如回复力矩、横倾及纵倾角度，船首尾吃水等是

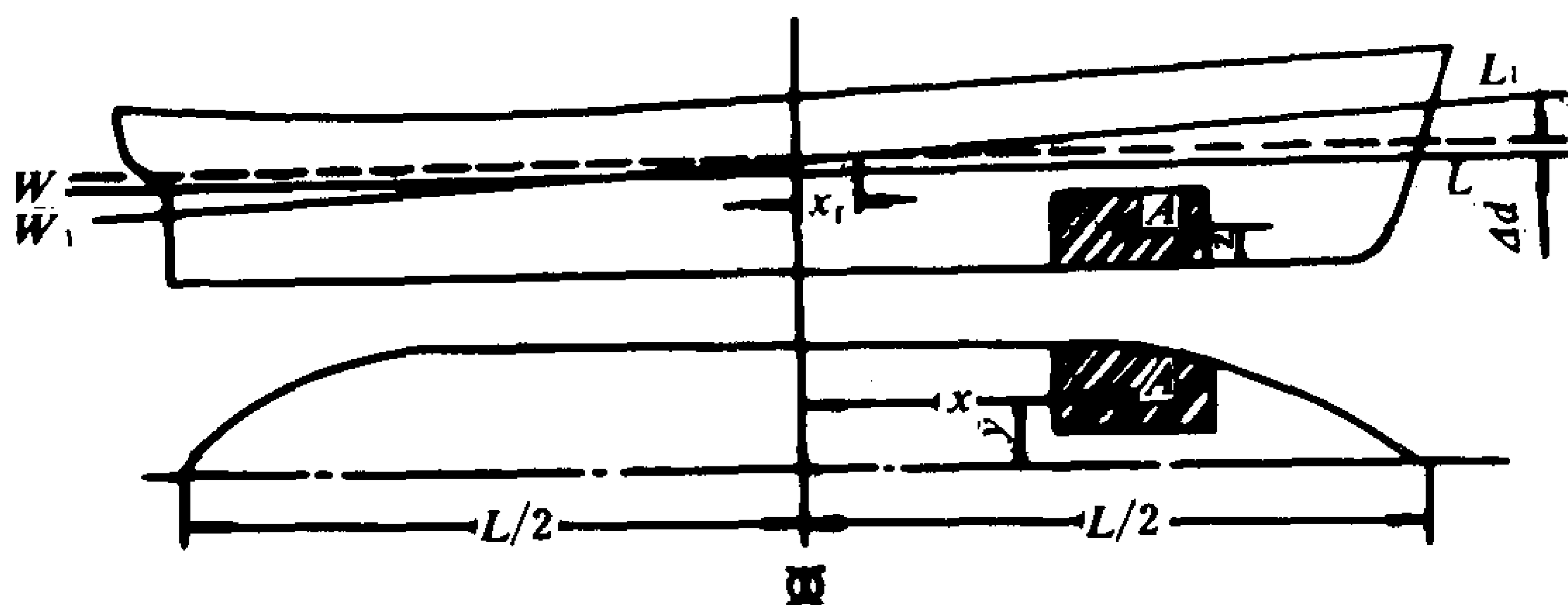


图 1.2.4-37　第一类舱进水

完全一致的。在有些情况下，损失浮力法较为简便。下面用这种方法来计算三种典型的舱室进水影响。

5.2.2　第一类舱进水后船舶浮态和稳性的变化

如图 1.2.4-37 所示，舱顶在水线之下，船体破损后水灌满整个舱室，舱内没有自由液面，此为第一类舱。

1)平均吃水增加

$$\Delta d=\frac{V}{A_W}$$

式中：V——舱室容积，m^3。

2)新的初稳心高

$$h_1=h+\frac{v}{V}(d+\frac{\Delta d}{2}-Z)$$

$$H_1=H$$

3)横倾角和纵倾角

$$\mathrm{tg}\theta=\frac{vy}{Vh_1}$$

$$\mathrm{tg}\psi=\frac{v(x-x_f)}{VH}$$

4)首尾吃水

$$d_{F1}=d_F+\Delta d+(\frac{L}{2}-x_f)\mathrm{tg}\psi$$

$$d_{A1}=d_A+\Delta d-(\frac{L}{2}+x_f)\mathrm{tg}\psi$$

这类舱破损进水，使初稳心高增加。抗沉指挥员必须了解哪些舱室进水后，能增加初稳心高，以便在必要时，可以有意识地灌注这类舱室。

5.2.3　第二类舱进水后浮态和稳性的变化

如图 1.2.4-38 所示，进水舱未被灌满，舱内的水与舷外水不联通，有自由液面，此为第二类舱，舱室进水对浮态和稳性的影响，与第一类舱比，多了自由液面的影响。

1)平均吃水增加

$$\Delta d=\frac{v}{A_W}$$

2)初稳心高增量

$$\Delta h=\frac{v}{V}(d+\frac{\Delta d}{2}-z)-\frac{ix}{V}$$

图 1.2.4-38 第二类舱进水

图 1.2.4-39 第三类舱进水

$$\Delta H=\frac{v}{V}(d+\frac{\Delta d}{2}-z)-\frac{iy}{V}$$

其它计算公式与第一类舱进水时之公式同。

5.2.4 第三类舱进水后浮态和稳性的变化

如图 1.2.4-39 所示，舱的顶盖在水线以上，舱内的水与舷外的水相通，舱内水面与舷外水保持同一水平面，此为第三类舱。设该舱在 WL 水线以下的体积为 v，形心在 $A'(x、y、z)$ 处，进水面积为 A，其形心在 $f(x_A、y_A)$ 处，A 即为损失掉的水线面积。

1)平均吃水增量

$$\Delta d=\frac{v}{A_{wo}-A}$$

式中：$A\omega_0$——原水线面面积；

$A\omega_0$-A——有效水线面积。

2)有效水线面积的漂心位置 $F'(x_f', y_f')$

$$x_f'=\frac{Aw_0x_f-Ax_A}{Aw_0-A}$$

$$y_f'=\frac{-Ay_A}{Aw_0-A}$$

3)x 方向的损失惯性矩

$$i_{px}=i_{AX}+Ay_A^2(1+\frac{A}{A_{wo}-A})$$

y 方向的损失惯性矩

$$i_{py}=i_{Ay}+A(x_A-x_f)^2(1+\frac{A}{A_{wo}-A})$$

4)纵横稳心高的变化

$$\Delta h=\frac{v}{V}(d+\frac{\Delta d}{2}-Z)-\frac{i_{px}}{V}$$

$$\Delta H=\frac{v}{V}(d+\frac{\Delta d}{2}-Z)-\frac{i_{py}}{V}$$

5)横倾角与纵倾角

$$\mathrm{tg}\theta=\frac{v(y-y_f')}{Vh_1},\ \mathrm{tg}\psi=\frac{v(x-x_f')}{VH_1}$$

式中：$h_1=h+\Delta h$；$H_1=H+\Delta H$

6)首尾吃水变化

$$\Delta d_F=\Delta d+(\frac{L}{2}-x_f')\mathrm{tg}\psi$$

$$\Delta d_A=\Delta d-(\frac{L}{2}+x_f')\mathrm{tg}\psi$$

5.2.5 舱组进水时浮态和稳性的计算公式

一组舱室大破损进水，船舶浮态和稳性可采用等量舱的方法计算。

1)等量舱的进水容积

$$V=\sum_{1,2,3}V_i$$

式中，和号下的注脚1、2、3表示舱组中的第一、二、三类舱；V_i是某个进水舱的进水容积。

2)等量舱的进水容积中心

$$x=\frac{1}{v}\sum_{1,2,3,}v_ix_i$$

$$y=\frac{1}{v}\sum_{1,2,3}v_iy_i$$

$$z=\frac{1}{v}\sum_{1,2,3}v_iz_i$$

式中：x、y、z——等量舱进水容积中心坐标；

x_i、y_i、z_i——舱组中各进水舱进水容积中心坐标。

3)等量舱在原来水线处的进水面积

$$A=\sum_{3}A_i$$

式中：A_i——舱组中第三类舱之进水面积。

4)等量舱进水面积的中心坐标

$$x_A=\frac{1}{A}\sum_{3}A_ix_{Ai}$$

$$y_A=\frac{1}{A}\sum_{3}A_iy_{Ai}$$

式中：x_{Ai}、y_{Ai}——舱组中第三类舱各舱进水面积中心坐标。

将所得的等量舱诸元代入第三类舱单舱进水公式中，即可求得舱组进水对浮态和稳性的影响。

本节中所用的计算公式都是根据初稳心公式而得。若进水量较大，可用逐步近似法以求

得比较正确的结果。但在实际工作中，甲板未入水或舭部未出水的情况下仍可近似地采用上述等量舱公式。

本节的有关计算公式，假定进水舱是空的，即渗透率$\mu=1$，事实上各进水舱的μ总是小于1。因此，应根据进水舱的实际渗透率μ值先算出进水容积μv、进水的自由表面面积μA及进水舱的惯性矩(均以体积渗透率计算)，然后再计算船舶在破舱后的浮态和稳性。各类舱室的体积渗透率μ_v值见表1.2.4-12。

表1.2.4-12　**舱室的体积渗透率**

舱室名称	渗透率 μ_v
起居处所	0.95
机舱、电站、渔业加工设备处所	0.85
杂货舱、散装货舱(矿砂除外)、煤舱、物料舱	0.60
钢材、生铁、矿砂等重货的货舱	0.80
装载油、水的双层底、深舱及尖舱	0或0.95①
空舱	0.98

① 视何者对破仓稳性较为不利而定。

5.3 船舶的分舱

船舶分舱是指将船舶沿船长方向进行水密分隔，使水密横舱壁的设置满足有关《公约》和《规范》的规定，以保证船舶的抗沉性。

5.3.1 可浸长度

1)舱壁甲板——水密横舱壁所到达的最高一层甲板。

2)限界线

在船侧由舱壁甲板上表面以下至少76 mm处所划的线，如图1.2.4-40所示。

3)分舱载重线

船舶分舱计算时的初始水线。民船通常取满载水线为分舱载重线。

4)可浸长度

在分舱载重线WL时，设船舶某一假想舱AB破损进水，使船舶下沉和纵倾，最终平衡状态时的新水线W_nL_n，刚好与限界线相切(切点E)，则把这一假想舱的长度定义为该舱长中点R处的可浸长度l_F，W_nL_n称为极限海损水线。可浸长度是规定的两水密横舱壁间的极限长度，它意味着对应的干舷高度最低处(切点E)为76 mm。当船舶两水密横舱壁的间距l大于l_F时，则破舱后将导致甲板淹水；当$l<l_F$时，则破仓后的平衡水线W_nL_n将在限界线以下，即甲板不致淹水。可浸长度的大小与其所在位置R有关。将R点的可浸长度表示为R点的垂距$RC=l_F$。将各R点的可浸长度画成图1.2.4-40所示的可浸长度曲线。据此可得沿船长任一位置处的可

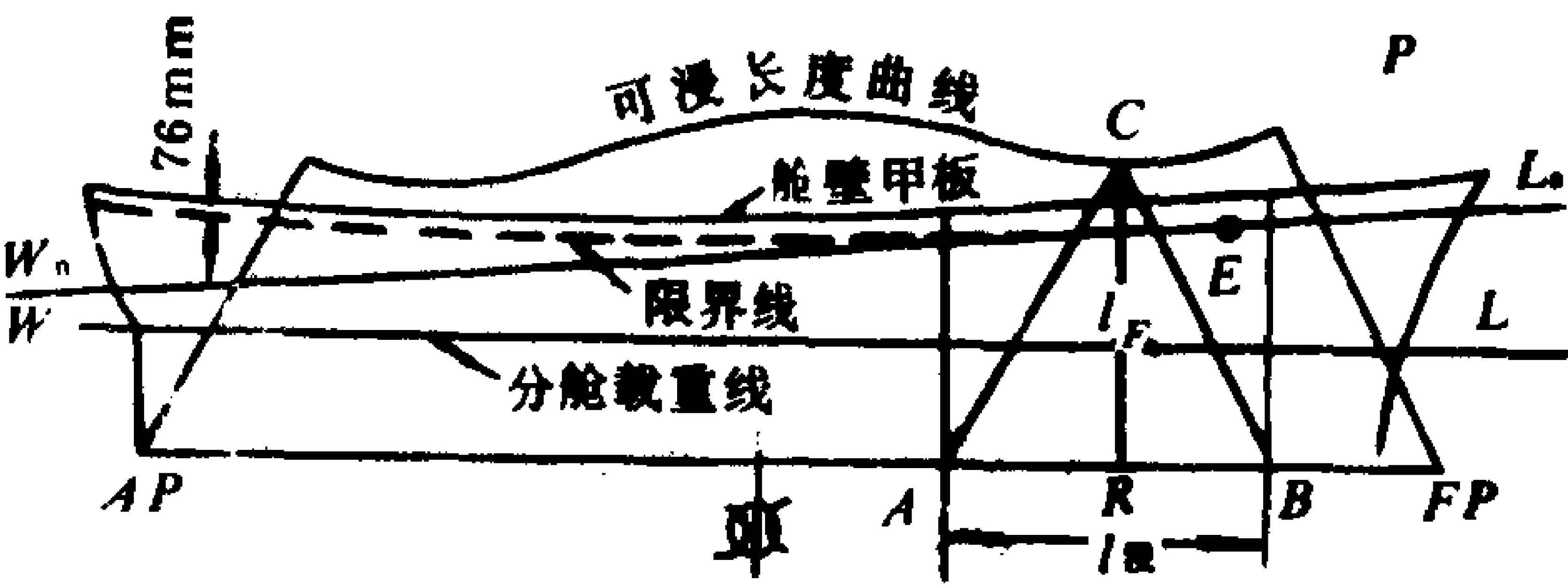


图1.2.4-40　可浸长度曲线

浸长度。干舷高度愈大l_F愈大，l_F还与渗透率μ有关。《海船抗沉性规范》用平均渗透率，机炉舱部分μ_m；机炉舱以前部分μ_F；机炉舱以后部分μ_A。其近似计算公式详见《规范》。计及各部分平均渗透率后的可浸长度曲线见图 1.2.4-41。

若根据详细计算方法求可浸长度时，其各处所的渗透率可按表 1.2.4-11 的规定选取。

5.3.2　许可舱长l_p

为体现出对各类船舶在抗沉性方面要求的不同，在《海船抗沉性规范》中采用了一个分舱因数F来决定许可舱长，F是一个等于或小于 1 的系数，则有：

$$l_p = l_F \times F$$

于是，便得许可舱长曲线，如图 1.2.4-42 所示。当$F=1.0$时，$l_p=l_F$，船在一舱破损后恰能浮于极限海损水线而不致沉没。当$F=0.5$时，$l_p=\frac{1}{2}l_F$，船在相邻二舱破损后恰能浮于极限海损水线。当$F=0.33$时，$l_p=\frac{1}{3}l_F$，船在相邻三舱破损后恰能浮于极限海损水线。如果船舶在一舱破损后的海损水线不超过限界线，但在二舱破损后其海损水线却超过了限界线，则该船的抗沉性只满足一舱不沉的要求，称为一舱制船。相邻两舱破损后能满足抗沉性要求的船称为两舱制船。相邻三舱破损后、仍能满足抗沉性要求的船称为三舱制船。若用分舱因数F来表示。则：

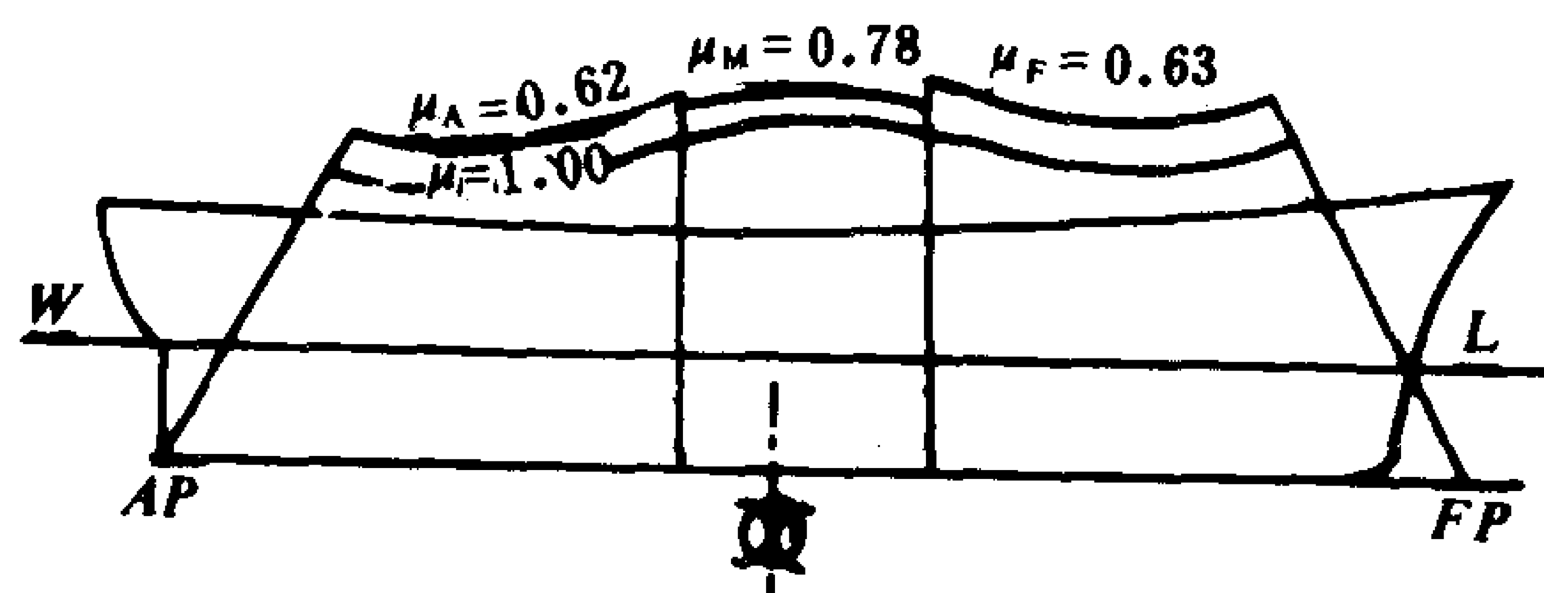


图 1.2.4-41　计及μ的l_F曲线

对于一舱制船，$1.0 \geq F > 0.5$；

对于二舱制船，$0.5 \geq F > 0.33$；

对于三舱制船，$0.33 \geq F > 0.25$。

由此可见，分仓因数F是决定船舶抗沉性要求的一个关键因素，其具体数值与船舶长度、用途及业务性质有关，详细规定见《海船抗沉性规范》。

船上水密舱的划分，是根据实际需要而布置的。许可舱长曲线仅作为保证船舶满足抗沉性要求而对舱的长度加以一定限制。若实际舱长小于或等于许可舱长，则船舶的抗沉性是满足要求的。

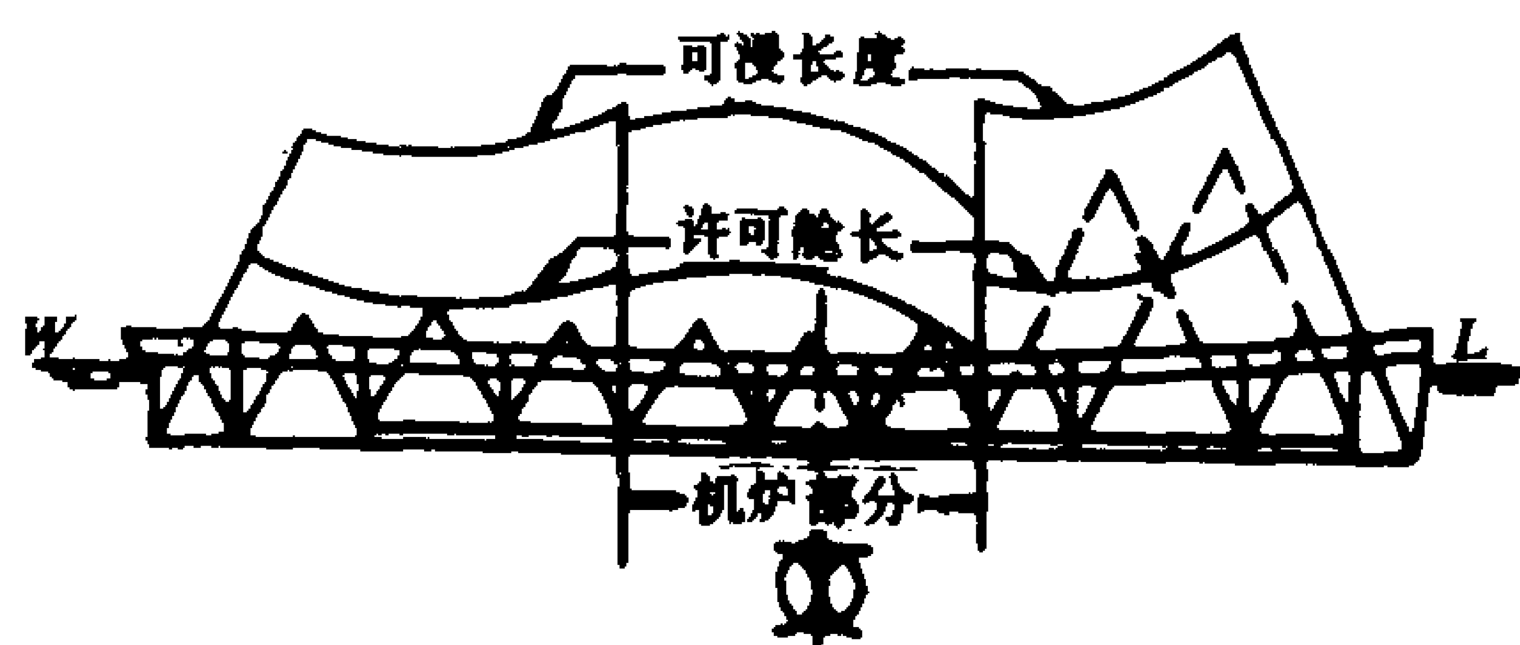


图 1.2.4-42　许可仓长曲线

在上述许可舱长的计算中，没有考虑海损后的稳性问题。故尚需对稳性进行校核计算。对于一舱制船舶，应计算任一舱室进水后的稳性，对于二舱制、三舱制船舶应分别计算二个或三个相邻舱室同时进水后的稳性。

"船舶分舱和破舱稳性报告书"应由设计部门提供，供船长在营运条件下掌握对分舱的要求，事先估计船舶进水后所处的状态，从而采取必要的措施，以维护破损船舶的安全。

5.4　平衡船舶

当船的破洞很大，以致不能堵住它，或者排水工具破坏，则在破舱中存在淹水，船的稳

心高可能大大地减小，或甚至变成负值，横倾和纵倾会达到不允许的大倾角度，干舷变得很小，严重时上甲板可能浸水，此时必须采取平衡破损船舶一系列的措施。

5.4.1　平衡破损船舶的目的

1)防止破损严重使船失去稳性而沉没；

2)保证最有效地使用船上的武器和技术器材；

3)尽可能恢复船舶的航行性能。

5.4.2　平衡船舶的基本方法

1)对称灌注法：即在破损舱的对角或对端加灌海水，如图 1.2.4-43 所示。

2)导移载荷法：即将破损舱附近的载荷移至破损舱的对称舱。通常是导移液体载荷，也可搬动其他重物，如图 1.2.4-44 所示。

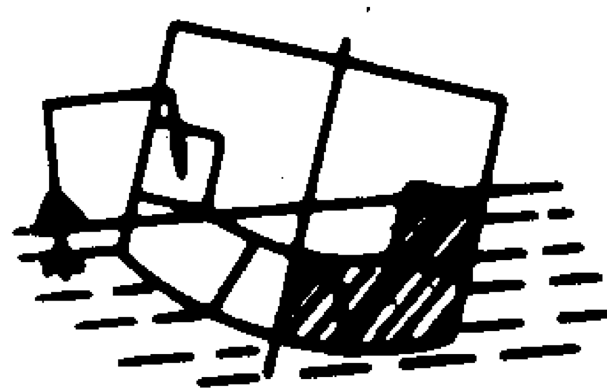


图 1.2.4-43　对称灌注法

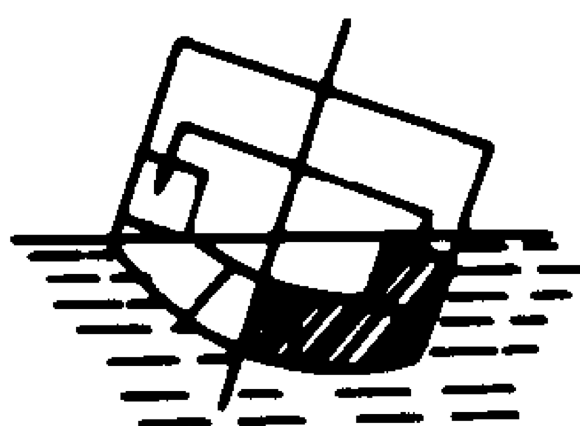


图 1.2.4-44　导移载荷法

3)排出载荷法：即排出破损舱附近的载荷，或排出堵好破洞的灌舱积水。如图 1.2.4-45 所示。

4)综合平衡法：即综合采用对称灌注、导移载荷、排出载荷三种方法，如图 1.2.4-46 所示。

对称灌注法速度快，如果灌注舱室低，还能提高稳性。但要损失贮备浮力。在贮备浮力已处于极限时，一般不得采用。但如果只有灌注才能提高稳性免于倾覆、及只有及时控制住纵倾、横倾的增长才有可能防止船舶倾覆时，仍需采用。

导移载荷法不再损失贮备浮力，但速度慢，还可能引起燃油渗水。在扶正任务不紧迫时可用，但要注意不得把与舷外相通的舱室的油水导入其它舱室。

排出载荷法能节约贮备浮力。但可排物不多，排出燃油会降低续航力，暴露航迹和污染海域，排出被淹舱室的水往往不易奏效。

通常，应根据具体情况，采用综合平衡法，一般是为了迅速减小纵倾和横倾或提高稳性，向一定数量的舱室注水，与此同时或稍后进行导移载荷或排出载荷作进一步平衡。

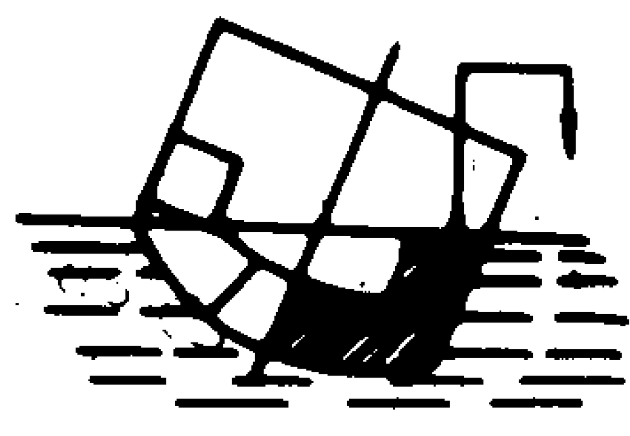


图 1.2.4-45　排出载荷法

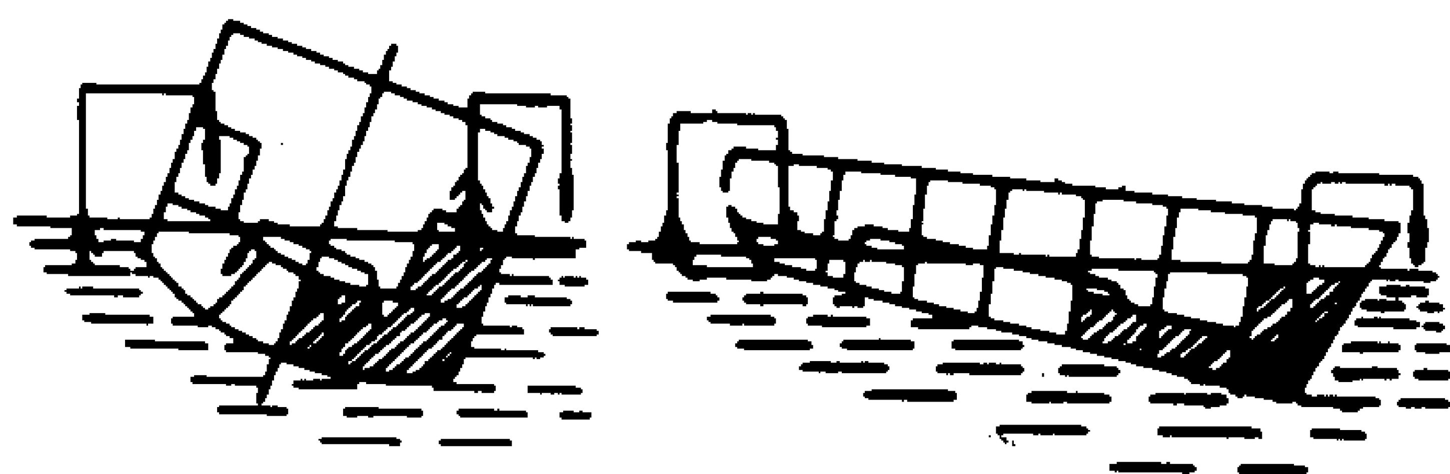


图 1.2.4-46　综合平衡法

5.4.3　平衡船舶的基本原则

1)为恢复稳性采取的措施应先于平衡倾侧采取的措施。

2)节约贮备浮力，提高稳性，必要时以贮备浮力换取稳性。

3)破损时凡出现大面积自由液面，应先按负初稳性对待。

4)采用加反力矩的办法来平衡船舶，只有在破损船舶具有正初稳性的情况下方可进行。

5)在任何情况下，均应切实查明，哪些舱室被淹和怎样被淹。

6)平衡前，必须查明干舷、甲板、平台和舱壁是否完好无损，以防在平衡过程中水经过其它的漏洞自行进入其它舱室。

因此，在采用对称灌注法时，应尽可能选择低于水线，远离中线面和中站面的舱室，要考虑到既可减小横倾又能减小纵倾，首先应扶正横倾，在非常必要的情况下如船舶一端的上甲板已淹没在水中才单独扶正纵倾，舱室应尽量注满。在采用导移载荷法时，应选对称远舱，尽量从高处往低处导，并尽量导尽装满。在采用排出载荷法时，应选近而高的舱室，尽量排尽，排底舱的载荷时应注意稳性下降，一般不排底舱。如果不了解破损被淹舱室的确实情况，则可分阶段平衡船舶，根据对前一阶段稳性的判定，选择出下一阶段应选的平衡舱，详情见5.4.4之3)。

为了易于确定破损船舶的浮性和稳性，以及选择扶正的舱室，应制订各种抗沉表。

也可能有这种情况：船舶大破损后贮备浮力损失殆尽，但船舶横倾纵倾较严重，并有继续增加的趋势；或者存在大面积自由液面，船舶摇摆软弱无力，摇摆周期特别大，从多方面判断，剩余稳性已很小，有倾覆危险。这时宁愿向底部舱室对称灌满水，损失部分贮备浮力，使稳性提高，使能正直下沉。这就是原则中所谓以贮备浮力换取稳性。因丧失稳性而倾覆是突然的，丧失贮备浮力正直下沉时间较长，牺牲贮备浮力换取稳性，可赢得时间，就有可能转危为安。

5.4.4 平衡参考文件

1)抗沉性标板图及其应用

(1)抗沉性标板图

是一块指示板。上面有舱室分布、载荷分布、船舶抗沉性情况。军舰上的是根据正常排水量制订的，商船根据满载排水量制订。功用是供抗沉参考。典型的标板图由三部分组成，如图1.2.4-47所示。

①燃油舱使用次序表。如图右上部分所示，空格内填写实际油量。

②稳性、贮备浮力指示表。如图右下部分所示，可指出按燃油舱使用次序用油时，初稳心高h、贮备浮力W_n、排水量V和吃水T等当时的具体数字。

③单舱灌注影响图。如图左半部所示。图上提出单舱进水后对不沉性的影响，在舱的四角标有该舱进水的容积(V)，该舱进水后船的倾斜角($\theta°$)、倾差(Δ)及初稳心高度变化(Δh)。也有的标注该舱进水后船首尾吃水变化(Δd_F, Δd_A)、进水容积(V)和初稳心高度变化(Δh)。

(2)抗沉性标板的使用方法

①及时将油水以及其它重大可变载荷数量填到图的相应位置上，并随时修改，使之符合当前的实际数量，供备忘、平衡参考用。

②按规定次序使用燃油柜，及时了解当时的贮备浮力、初稳心高和吃水。

③破损进水时，标明破损进水舱，水蔓延的趋势和范围。经过堵漏、支撑、排水等措施淹水区基本稳定后，用叠加法估计船舶的浮态和初稳性变化，即查四角号码数字的代数和：Σv、$\Sigma\theta$、$\Sigma\Delta$、$\Sigma\Delta h$。然后针对主要威胁是倾斜？倾差？还是稳性大幅度下降？根据标板图考虑平衡方案（采取什么平衡方法，选哪些舱室平衡），其结果应该是：

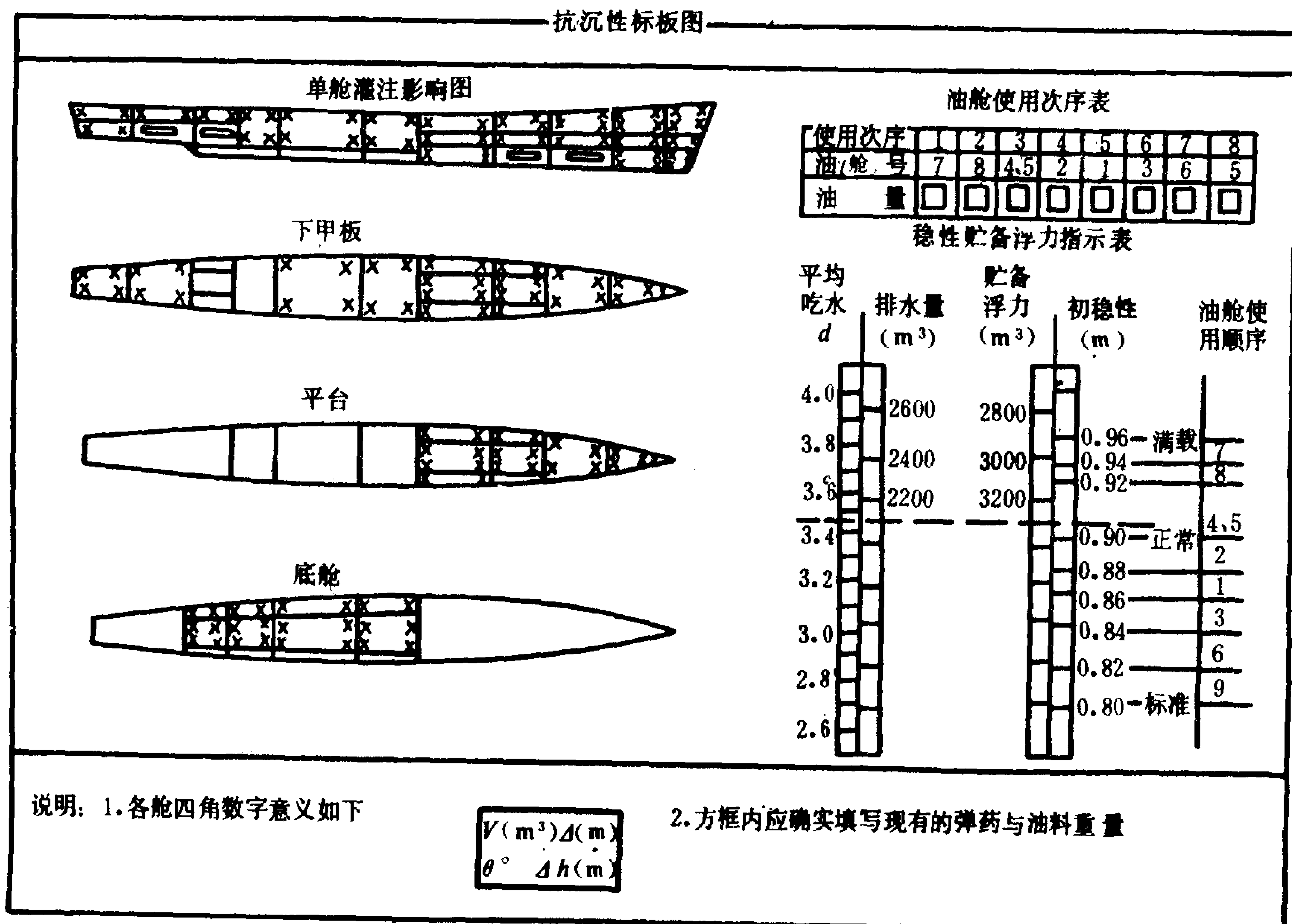


图 1.2.4-47 抗沉性标板图

$$\sum\theta(\text{平衡舱}) \approx |-\sum\theta| \quad (\text{破损舱})$$
$$\sum\Delta(\text{平衡舱}) \approx |-\sum\Delta| (\text{破损舱})$$
$$\sum\Delta h(\text{平衡舱}) \approx |-\sum\Delta h| (\text{破损舱})$$

采用平衡措施前，必须估计平衡后的总结果，即估计剩余倾斜角、剩余倾差、最后初稳心高。

利用标板图对于单舱是较准确的，少量舱可叠加，但是近似值，多舱则准确性差，但作为参考估算也是可以的。

2)战用抗沉表

为解决多舱进水问题，可使用“战用抗沉表”，见表 1.2.4-13。此表是假定某些舱破损进水，按舱组破损之等量舱室法进行计算，并拟好相应的若干个平衡方案，供平衡时作参考。其内容分为三大栏：第一大栏内列出假定破损进水舱被淹将会产生的后果；第二大栏内列出相应的平衡方案及平衡舱灌注后的总结果；第三大栏是灌注图，将破损舱和平衡舱简明地算出来。该表的使用方法：

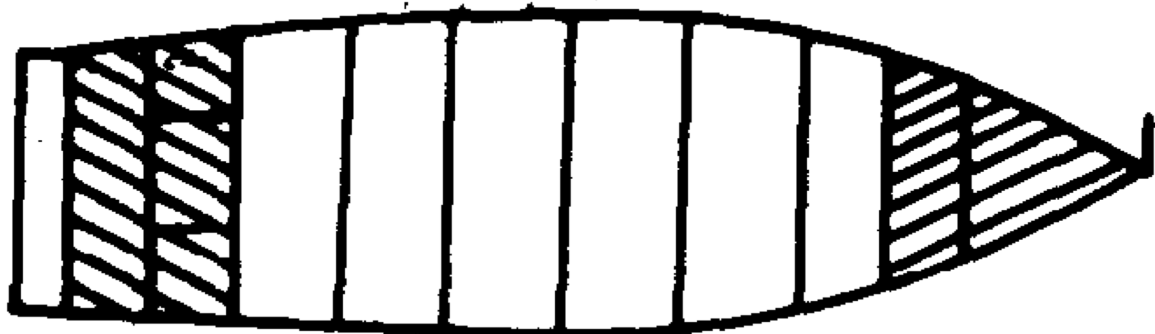
（1）当舱室破损进水时，查明破损进水舱及进水程度，确信水线附近无其他破口（或立即堵住），以免在扶正时发生意外。

（2）在第一大栏内，对照相应的破损舱组的θ、Δ、d等是否与实际一致，若相符或相近，可进行下一步平衡工作，若不符，则须检查原因，再作处理。

（3）在第二大栏内选平衡方案(可参考第三大栏灌注图)。明确总的结果θ、Δ、d等，然后灌注平衡。在平衡过程中要密切注意和控制倾斜倾差的变化，使其逐渐消除。

表 1.2.4-13

战用抗沉表

破损舱被淹后果											破损舱与平衡舱灌水后总的结果											灌注图
被淹舱组	破损舱肋骨号	破损舱名称	破损舱号	进水量	平均吃水变化	首吃水变化	尾吃水变化	倾斜角	倾差	横稳心高变化	平衡方案号	平衡用舱肋骨号	平衡仓名称	平衡仓号	灌水量	平均吃水变化	首吃水变化	尾吃水变化	总倾斜角	总倾差	横稳心高变化	
				v	Δd	Δd_F	Δd_A	θ	Δ	Δh					v	Δd	Δd_F	Δd_A	θ	Δ	Δh	
				m^3	cm	cm	cm	°	cm	cm					m^3	cm	cm	cm	°	cm	cm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	0-12	首尖舱 锚练舱 备用舱 声纳舱		60	8	48	-25	0	73	0	1-1	70-75 70-85 90-95	备用舱 大轴舱 备用舱		160	21	32	12	0	20	9	

此表的特点是采用对角灌注法，正负初稳性均可用；平衡快。但对贮备浮力不利；且多次破损进水就难以应用。此表应是设计人员提供，但管理人员也需补充方案。

3）分阶段平衡法

如果对船舶的破损情况不明，不了解破损后的稳性变化，这时只能采取分阶段的方法来平衡。其具体方法如下：

（1）测出破损进水后船舶的倾斜角$\sum\theta_b$。

（2）选取试平衡角θ_T

$$\sum\theta_T=\lambda\sum\theta_b$$

式中：λ——为安全系数，一般取$\lambda=1/3$。并从标板图上选取平衡舱，灌、导、排均可，应能使扶正角θ_p等于或接近于$\sum\theta_T$。

（3）进行试平衡。

（4）测出剩余倾斜角θ_R，算出实际扶正角θ_F。即

$$\theta_F=\sum\theta_b-\theta_R$$

（5）估算试平衡后船舶的实际初稳心高h_F，即

$$h_F=\frac{\theta_p}{\theta_F}\cdot h_p$$

式中，h_p为制订标板时排水量下的初稳心高。由上式可写出下式：

$$\frac{h_F}{h_p}=\frac{\theta_p}{\theta_F}=\frac{\sum\theta_{T'}}{\theta_R}$$

式中，$\sum\theta_{T'}$是第二次选取的平衡角。

（6）按$\sum\theta_{T'}$在标板图上选取平衡舱，并实施平衡。如无意外，则船舶应刚好被平衡。

5.4.5 船舶负初稳性的处理

1）判断负初稳性的方法

（1）当对纵中剖面对称的舱室淹水时，船有大于5°的横倾；

（2）当船舶在一舷有固定的横倾时，突然向另一舷倾斜，且在另一舷得到一固定的横倾；

（3）船在航行中转舵时，船由一舷向另一舷倾斜，且当舵回到正舵后，仍保持这个倾斜状态；

（4）甲板和平台处的大舱室局部受淹（具有自由液面）。

除了上述特征外，还可根据下列近似公式估计船舶甲板和平台处有大量积水时船舶是否具有负值初稳性。

$$k=k_0-\frac{r\sum b^3 l}{12}$$

式中：k——破损船的稳性系数；

k_0——未破损时船的稳性系数；

b——具有自由液面的每个淹水舱的甲板平均宽度；

l——这些舱的长度和。

如果$k<0$，船舶具有负初稳性。

在根据上公式计算时，不包括水量很少的舱室。

2）平衡负初稳性船舶的方法

（1）将亦于水线面的舱室的水抽至舷外；

（2）从大舱室中抽出淹水；

（3）阻止液体载荷流向浸水舷；
（4）将与舷外水不通的水放到低的舱室；
（5）堵塞破洞后疏干高处淹水舱，将液体载荷抽汲到或排放到底舱；
（6）用舷外水作船的压载；
（7）往下移动固体载荷；
（8）将高处的液体载荷抽到舷外；
（9）将高处固体载荷抛到舷外。

上面措施中最重要的是消除产生负初稳性的主要祸根的大面积自由液面。在进行各种措施中注意避免加反向力矩，故排除或压载要注意对称性。只有确信初稳性为正值后，才能用反力矩方法平衡船舶。如果对有负初稳性的船舶施加反向力矩，船舶会突然向相反的一舷倾斜，当动稳性贮备很小时，船舶可能倾覆。如果未倾覆，也会横倾在比在原来倾角还大的角度上。

6 船舶耐波性

船舶摇荡是一种有害的性能，剧烈的摇荡会降低船速、造成货损、损坏船舶结构、旅客晕船、影响船员工作等，甚至引起船舶倾覆。了解摇荡的规律性，从而采取相应措施以减小摇荡摆幅及增大周期，是船员应具备的知识。

船舶绕纵向轴的摇摆称为横摇，绕横向轴的摇摆称为纵摇，沿垂向轴的运动称为垂荡。船在波浪中行驶，有时可能出现单纯的横摇，而垂荡和纵摇则是同时产生的，在一般情况下则是三种摇荡的复合运动。

6.1 船舶在静水中横摇周期的估算

船舶在静水中自由横摇周期可由下式求得：

$$T_\theta = 0.58\sqrt{\frac{B^2+4Z_g^2}{h_0}} \qquad (1.2.4\text{-}59)$$

式中：h_0——所核算装载情况下船舶未计及自由液面修正的初稳心高，m；

B——不包括船壳板的最大船宽，m；

Z_g——所核算装载情况下船舶重心至基线的垂向距离，m。

由式（1.2.4-59）可见：h_0愈大，复原力矩愈有利，T_θ也愈小，但这会引起剧烈的横摇，易导致货移，反而危及船舶安全，为此在配载时，既要考虑重心过高使稳性过小，又要考虑重心过低使横摇过剧，故应积累经验，以掌握适当的初稳心高度。

常用自由横摇周期的经验公式为：

$$T_\theta = \frac{CB}{\sqrt{h_0}} \qquad (1.2.4\text{-}60)$$

式中：C——横摇周期系数。

B与h_0以m计。由于C值在一定装载情况下变化很小，故可由式（1.2.4-60）测出自由横摇周期后，倒过来求出相应状态下的初稳心高h_0各类船舶的横摇周期及系数C之统计值，见表1.2.4-14和表1.2.4-15。

表 1.2.4-14　　　　　　　　　　**横摇周期统计数值**

船	型	T_θ (s)
客船	D=500~1000t	6~9
	D=1000~5000t	9~13
	D=5000~10000t	13~15
	D=10000~30000t	16~20
	D=30000~50000t	20~28
货船		9~14
货船（压载）		7~10
拖船		6~8

表 1.2.4-15　　　　　　　　　　**横摇周期系数统计值**

船型	装载状态	C
客船	—	0.76~0.86
货船	满载	0.62~0.70
	空载	0.74~0.80
油船	满载	0.70~0.78
	空载	0.74~0.86
小船		0.78

6.2 船舶在静水中纵摇和垂荡周期的估算

纵摇周期可用下列经验公式确定：

$$T_\varphi = C_\varphi\sqrt{L} \tag{1.2.4-61}$$

式中：T_φ——纵摇周期，s；

L——船长，m；

C_φ——纵摇周期系数，客船为0.45~0.55，客货船为0.54~0.64，货船为0.54~0.72，油船—尾机为0.80~0.90

垂荡周期T_Z近似等于纵摇周期T_φ，或用下列经验公式：

$$T_Z = 2.4\sqrt{d} \quad (s) \tag{1.2.4-62}$$

式中：d——吃水，m。

6.3 船舶在波浪中横摇角的估算（见4.5）

6.4 避免谐摇的措施

船舶在波浪中航行时，自摇周期T_θ与波浪周期τ_b相近时，摆幅会达到最大值，此时称船舶谐摇，图1.2.4-48为横摇摆幅曲线，从图中可见在

$$0.7 < T_\theta/\tau_b < 1.3 \tag{1.2.4-63}$$

范围内摆幅均较大，故实用上把此范围称为谐摇区。

反映到稳心高h_0上，避免谐摇的条件为：

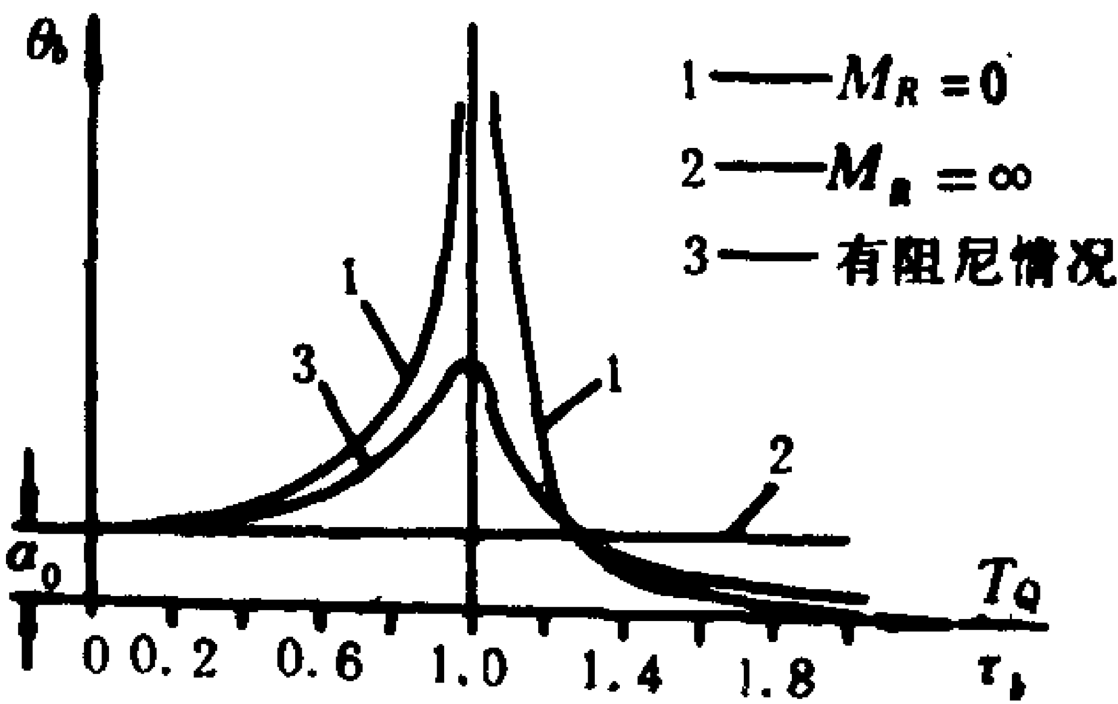


图 1.2.4-48　摆幅曲线

$$\left.\begin{aligned} h_0 &> 1.31\ (B/\tau_a)^2 \\ h_0 &< 0.379(B/\tau_a)^2 \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.4\text{-}64)$$

式中：τ_a为船与波浪的遭遇周期：

$$\tau_a = \frac{\tau_b}{1+(\frac{v_a}{u_b})\cos\psi} \qquad (1.2.4\text{-}65)$$

其中：v_a——船速，m/s；

u_b——波速，m/s；

ψ——v_a与u_b的顶偏角，顶浪时$\cos\psi=1$（$\psi=0°$），顺浪时$\cos\psi=1$（$\psi=180°$），横浪时，$\cos\psi=0$（$\psi=90°$）。

7 船舶操纵性

船舶操纵性是船舶能保持或改变航速、航向和位置的能力。

改变和保持航向的性能称为方向性，方向性包括回转灵活性和航向稳定性。对远洋运输船舶，其特点是长时间远程航行，而进出港时间短，为此应着重保持航向稳定性；对在狭水道或港内航行的船舶，则应着重考虑其回转灵活性。

船舶航行时，由于风、浪和流等外界条件的影响，以及螺旋桨工作时产生的横向力，经常使船偏离航向，要保持或改变航向，均须通过不断操舵才能实现。

7.1 回转圈

如图1.2.4-49所示，设船在转舵前作等速直线行驶，转舵后船舶重心G_0、G_1、G_2……轨迹的联线称为回转圈。回转圈的几何特征为：最初重心除继续前移外，同时向转舵反向横移，随后变成瞬时曲率半径R'逐渐减小的螺旋线；最后在船首改变量$\beta=120°$之后成为圆形，曲率半径R为定值，称为定常回转半径。

回转圈的几何要素如下：

（1）进距l_A——自开始转舵起至航向改变90°（$\beta=90°$）时止重心的前进距离；

（2）横距l_T——自原航向的延伸线至$\beta=90°$时重心的横移距离；

（3）偏距l_K——自原航向的延伸线至重心沿转舵反向横移的最大距离。对避碰而言，“偏距”量自原航向延伸线至尾梢尾点沿转舵反向横移的

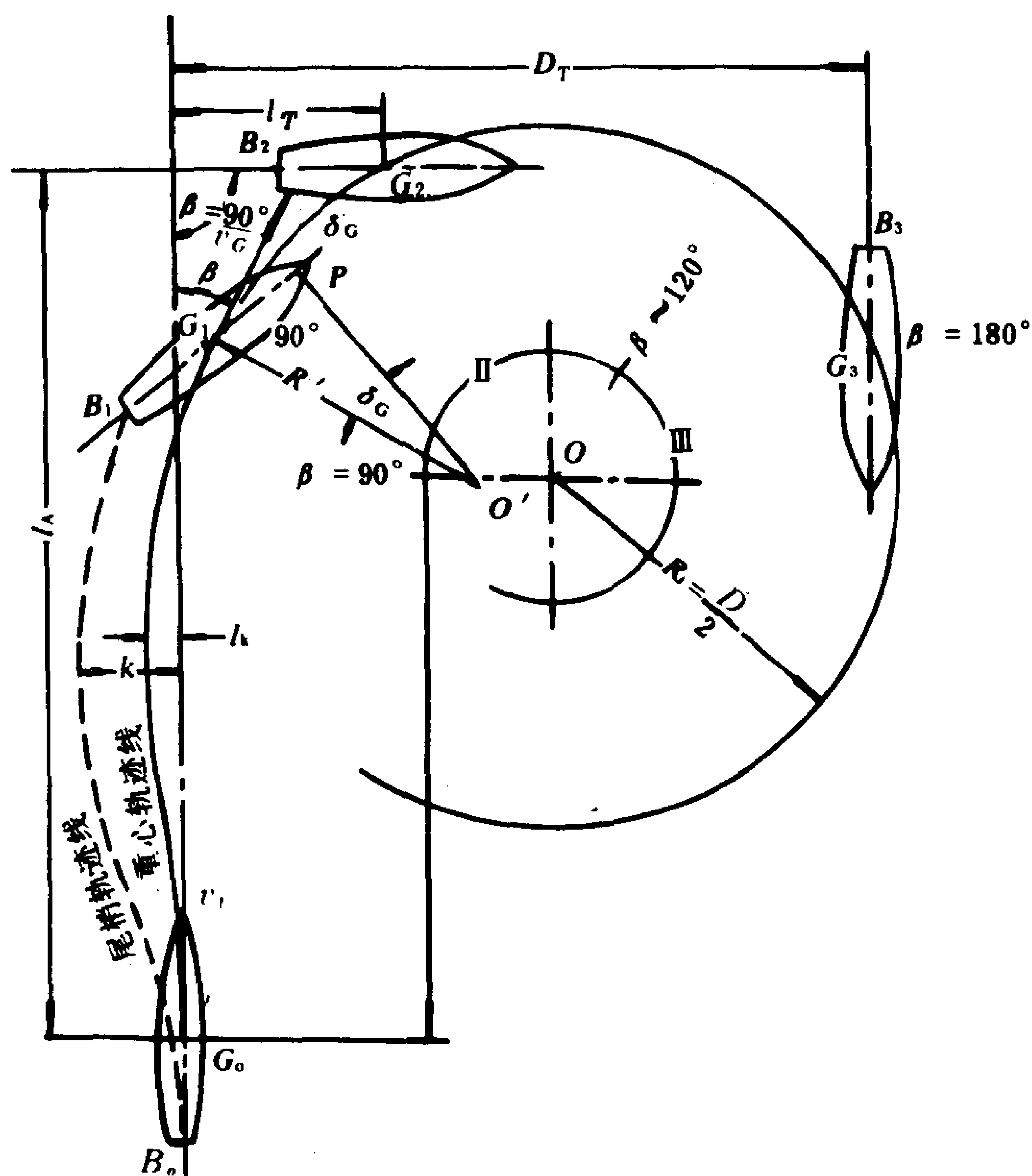


图 1.2.4-49 回转圈

最大距离，记为K；

（4）回转初径D_T——自原航向的延伸线至$\beta=180°$时重心的横移距离；

（5）定常回转直径D——船舶稳定圆航时重心轨迹的直径。

各类船舶D/L的统计值见表 1.2.4-16，其中D为定常回转直径，L为船长。

表 1.2.4-16　　D/L 统 计 值

船 舶 种 类	D/L	船 舶 种 类	D/L
大型远洋客船	7.5~8.0	大型货船	5~6.5
中、小型远洋客船	4~5	中型货船	4~5
大型客货船	5~7	油船	3.5~7.5
中小型客货船	4~5	拖船	1.5~2.3

其余特征量的统计值范围为：$l_A/D=0.6\sim1.2$；$l_T/D=0.5\sim0.6$；$D_T/D=0.9\sim1.2$；$l_K/D=0\sim0.1$，l_K一般不超过$B/2$。

7.2 回转中的横倾

船舶回转时作用于正横方向的力有：舵力的横向分力P_{ay}；水阻力之横向分力R_y和离心力的横向分力F_y。由于各力在垂向的作用位置不同，如图 1.2.4-50 所示，使船产生横倾。

在转舵初期，船舶向转舵方向稍有内倾，随后突然反向外倾，并在某一倾角θ_m附近稳定

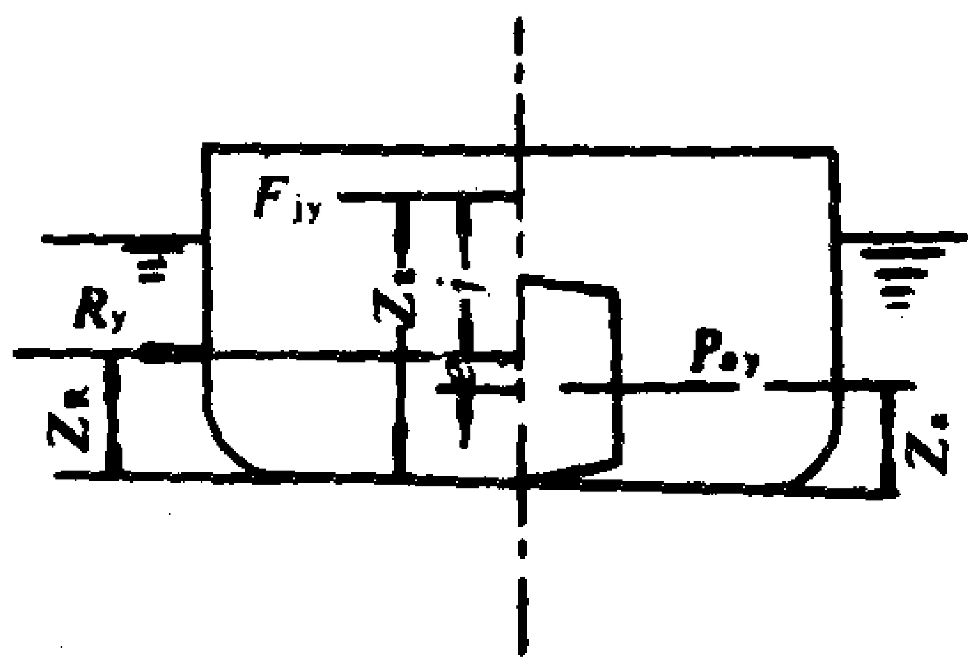


图 1.2.4-50　回转时的横向力

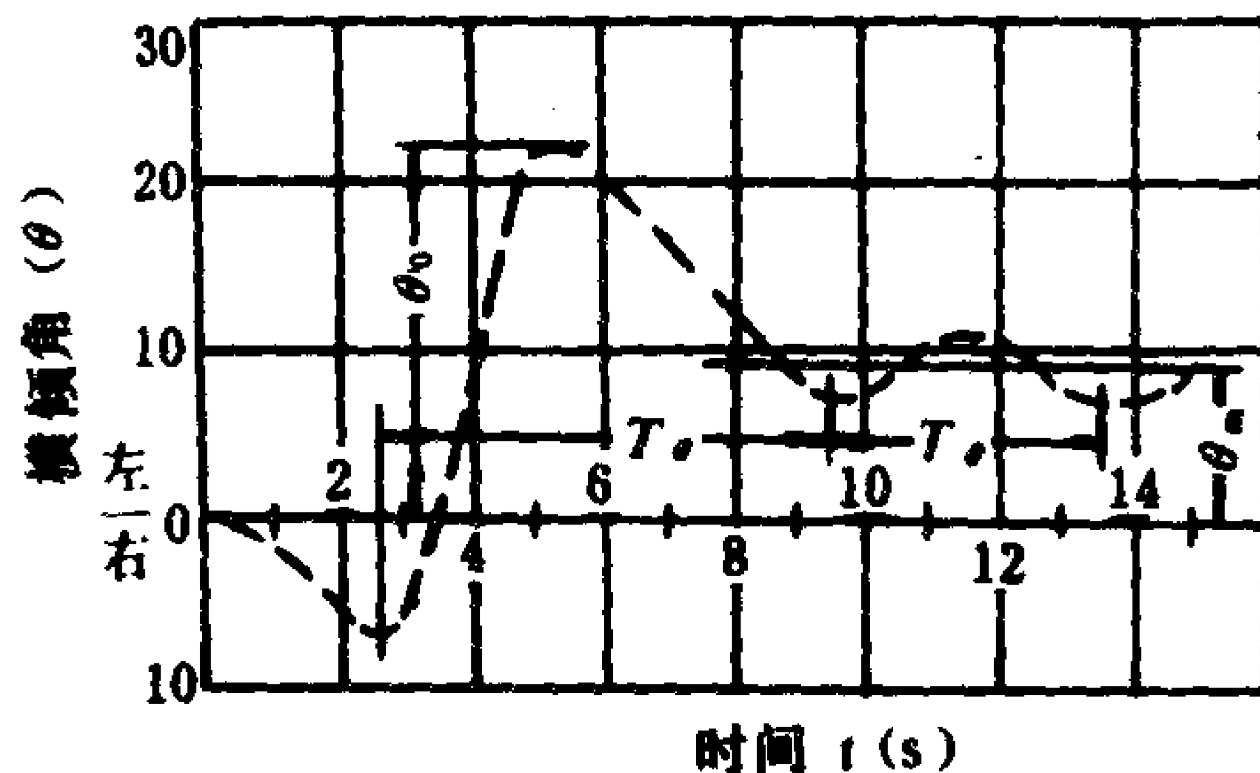


图 1.2.4-51　回转时横倾角变化

下来，如图 1.2.4-51 所示，θ_d是由于动力作用产生的最大横倾角。对于一般货船，θ_m约在 2°~4°之间，一般$\theta_d=(1.2\sim1.5)\theta_m$。$\theta_m$的近似公式为：

$$\theta_m=1.02\frac{v_s^2}{h_0L}\left(Z_g-\frac{d}{2}\right) \qquad (1.2.4\text{-}66)$$

式中：θ_m——圆航时最大横倾角，°；

v_s——回转前船的直航速度，m/s；

h_0——初稳心高度，m；

L——船长，m；

Z_g——船舶重心距基线高，m；

d——吃水，m。

7.3 回转中的速度降低

图 1.2.4-52 是实船试验结果。v_s为直航速，v_G为圆航速。速降比v_G/v_s约为 0.5~0.95，

D/L愈小时，速降愈明显。

7.4 K、T指数

船舶回转运动用一阶微分方程表示为：

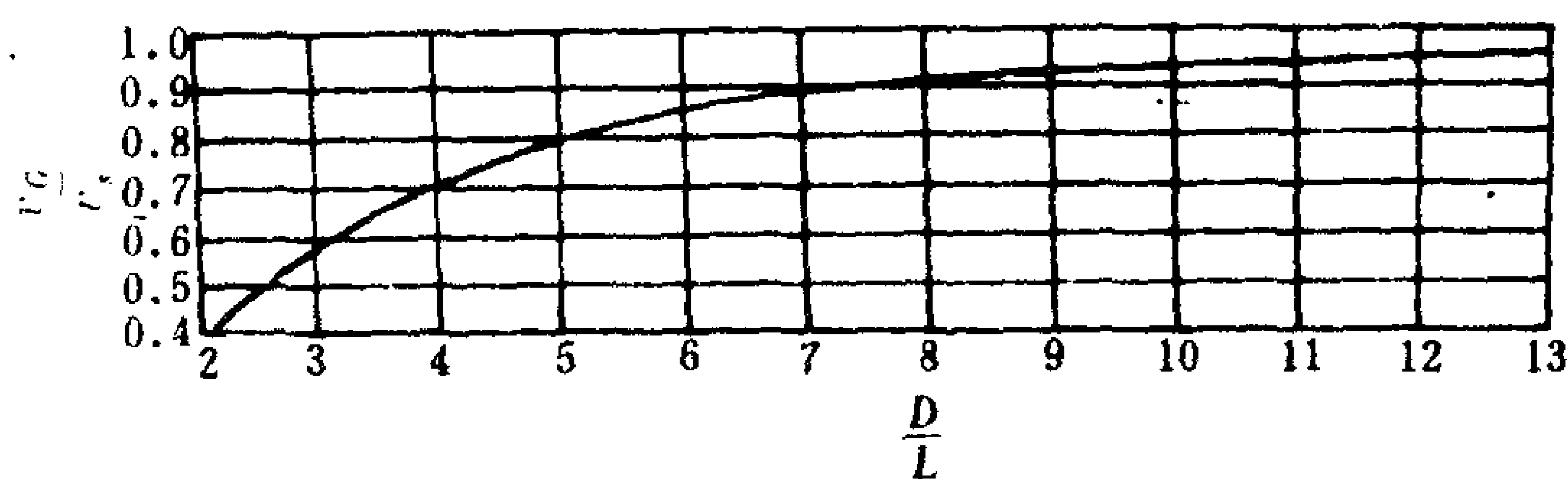


图 1.2.4-52 速降统计曲线

$$J_z\frac{d\omega}{dt}+N\omega=C\alpha \quad (1.2.4\text{-}67)$$

式中：J_Z——船舶绕Z轴的惯性矩；

ω——船舶回转角速度；

N——船舶回转时之阻尼力矩系数；

C——舵力的转船力矩系数；

α——舵角，度。

上式可化为：

$$T\frac{d\omega}{dt}+\omega=K\alpha \quad (1.2.4\text{-}68)$$

式中：

$$T=\frac{J_Z}{N}=\frac{\text{船的惯性矩}}{\text{单位角速度之阻尼力矩}}$$

$$K=\frac{C}{N}=\frac{\text{单位舵角之转船力矩}}{\text{单位角速度之阻尼力矩}}$$

T称为应舵性指数或直线稳定性指数。T大表示惯性很大，阻尼很小，船的航向稳定性好，T的量纲是s。K称为回转性指数，K大表示舵力矩大，阻尼力矩小，船的回转性能好，K的量纲为1/s。

K、T指数由Z形操纵试验求得。

7.5 实船操纵性试验

7.5.1 回转试验

这是确定回转圈几何要素的可靠方法。具体实施方法可参考回转试验规程。

7.5.2 Z形操纵试验

本试验的目的是确定船舶操纵性指数K、T，通常采用10°/10°操纵，式中分子表示舵角，分母表示换反向舵时船首改变量。试验结果得出舵角和首向角改变量随时间的变化曲线，如图 1.2.4-53 所示，从中可计算出K、T值，具体试验方法可参考有关规程。

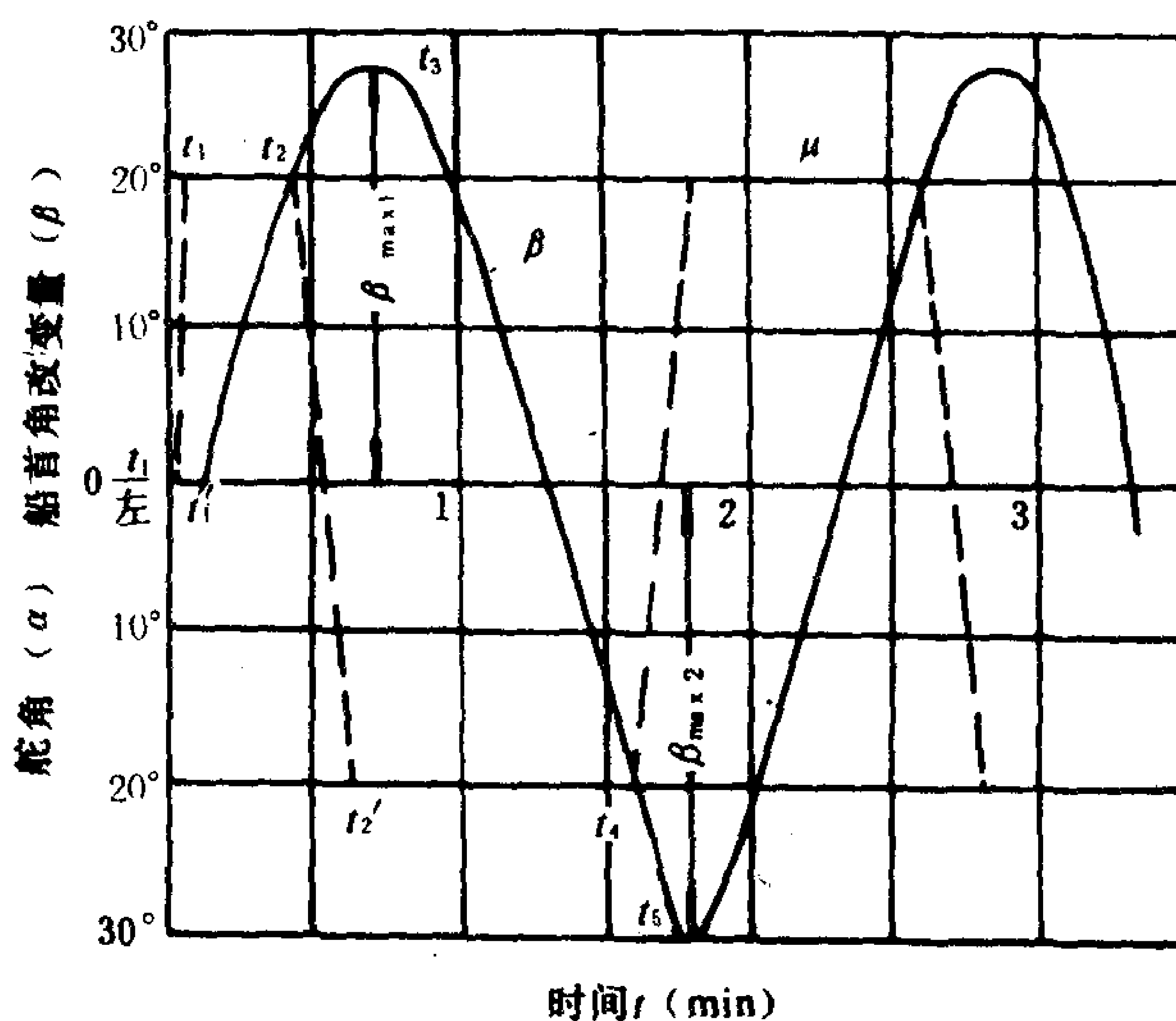


图 1.2.4-53 20°/20°Z形试验曲线

7.5.3 冲程试验

冲程试验是求出冲程，而冲程是避碰的一个重要依据。船舶雾航、狭水道航行及靠

离操纵均需根据不同装载和航速下的冲程来决定车速和停（倒）车的时机，如图 1.2.4-54 所示，是某船全速前进时快倒车的航迹，从中可测出：

停船冲程X_D：停车或倒车后，船舶沿原航向惯性前移的最大距离；

停船迹程S_D：停车或倒车后，船舶沿航迹前移的全部长度；

停船横距y_D：停车或倒车后，船舶自发令至船停，沿垂直于原航向的最大横移距离；

停船船首向改变量β_D：停车或倒车后，船舶自发令至船停，航向改变的角度。

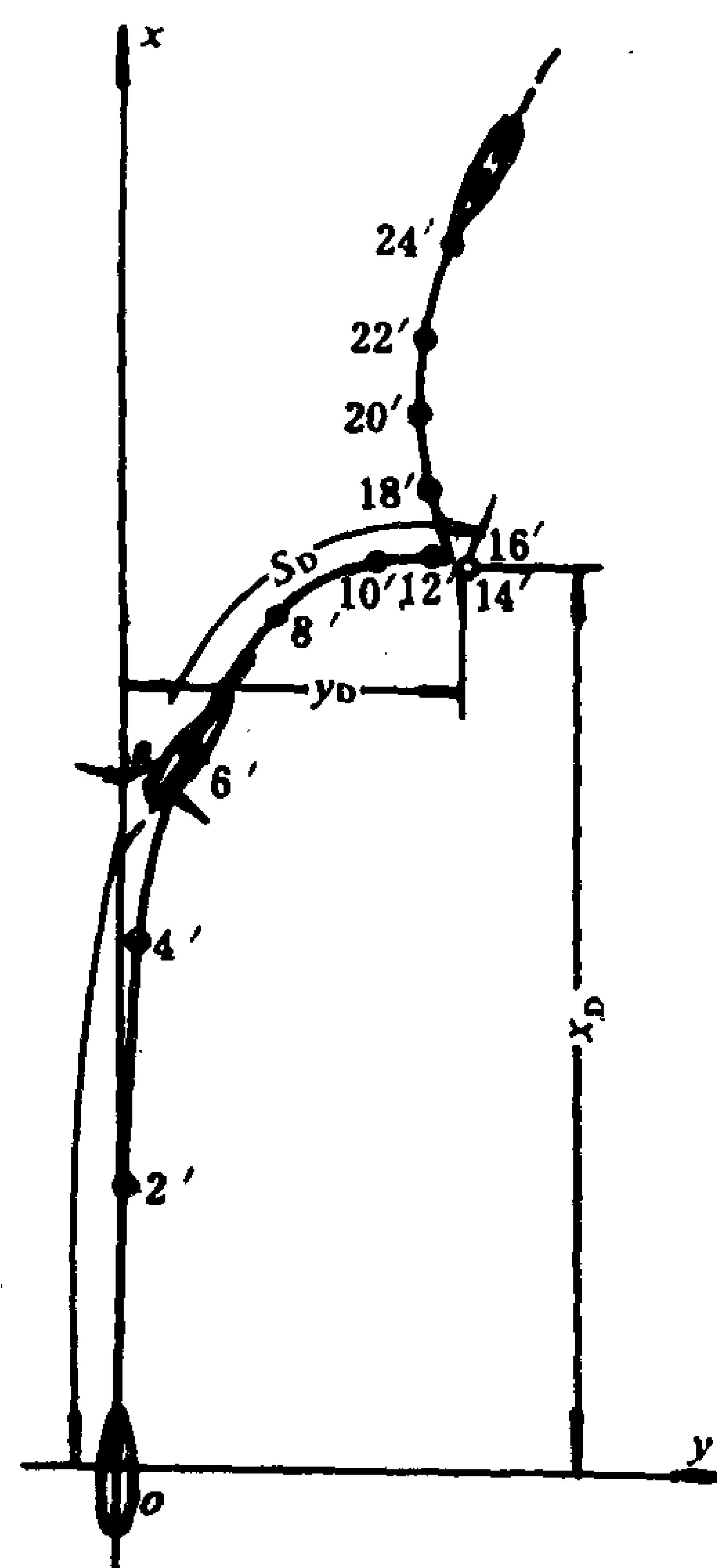


图 1.2.4-54
全速前进时快倒车航迹

7.6 舵

7.6.1 舵的类型

现代船舶已大多数采用流线型剖面的平衡舵和奥兹舵。

平衡舵在舵轴之前有一部分平衡的舵面积，这样可减小转舵所需功率，缺点是小舵角时由于有平衡部分容易使舵摆动，如图 1.2.4-55 a）所示。

奥兹舵是由固定部分（尾柱）和转动部分（舵叶）组成流线型剖面的整体，同样具有阻力小、舵力大的优点。它仅适用于单桨船，如图 1.2.4-55 b）所示。

图 1.2.4-55 c）是奥兹型整流舵，其舵柱根据螺旋桨排出流旋转的特点制成扭曲型，起整流作用，可提高舵力。

图 1.2.4-55 d）是主动舵，在舵上安装副螺旋桨，当主螺旋桨停车后，副螺旋桨可推船微速进退，转舵时副桨的推力可增大舵力。

图 1.2.4-55 e）为拖船采用的Z轴旋轴螺旋桨，它兼有推进器和舵的作用，计算机控制后，可使船向任意水平方向平动，操纵很灵活。

7.6.2 航行时的舵力

舵是一个有限翼展的机翼，其水动力特征与螺旋桨叶片类似。

设垂直于舵叶剖面中心线的分力为p_a，这就是舵力，其估算公式为：

$$p_a = 9.81 K S_R v_R^2 \quad (1.2.4\text{-}69)$$

式中：p_a——舵力，N；

S_R——舵板面积，$S_R = b \times h$，m^2；

b—板宽，h—板高；

v_R——水冲向舵的来流速度，m/s；

K——舵力经验系数，见表 1.2.4-17

表 1.2.4-17　舵力经验系数K

舵角	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
K	0	16.3	29	39	47.3	54	59.5	64.1

单桨单舵船：$v_R \approx v_S$；

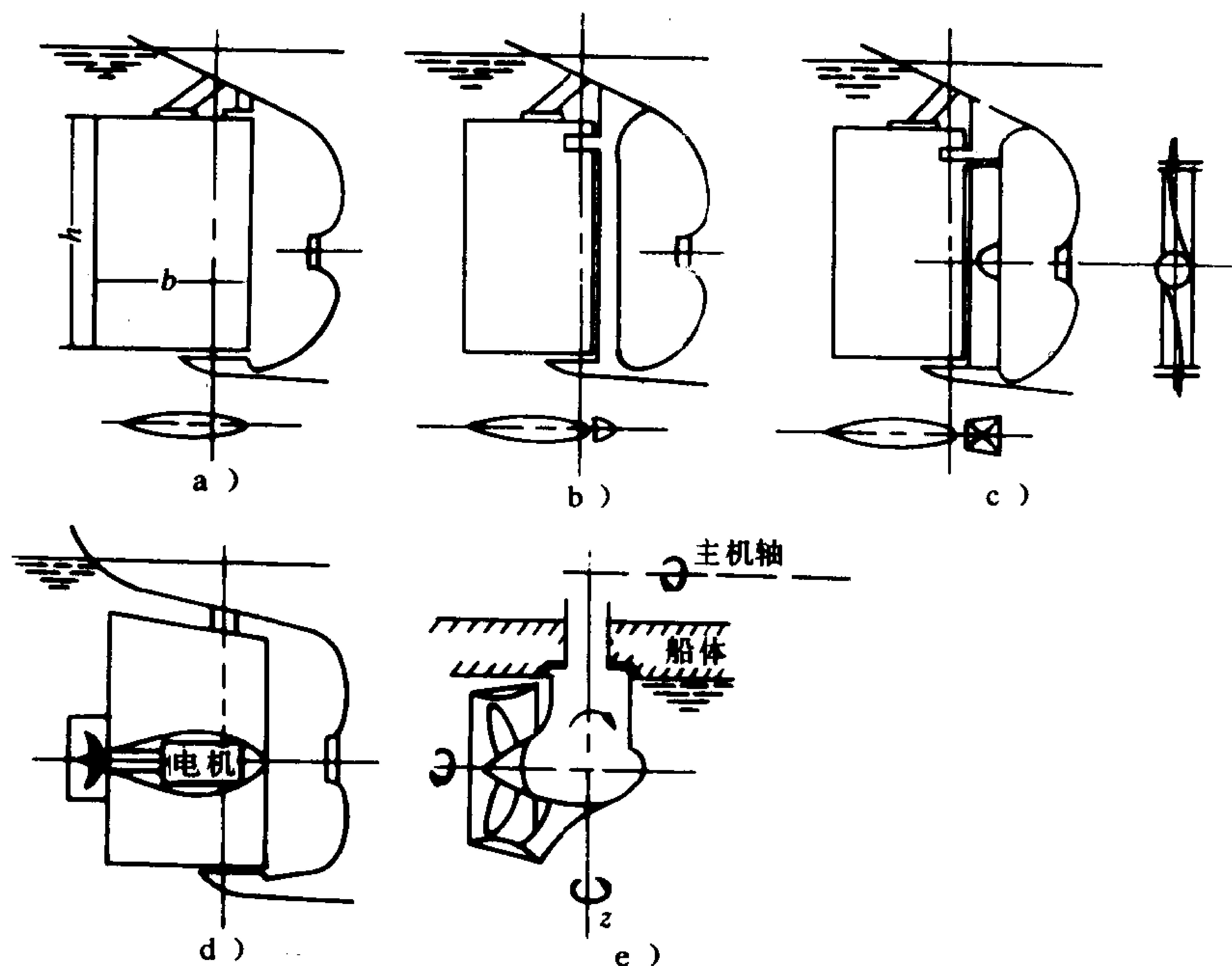


图 1.2.4-55　舵的类型

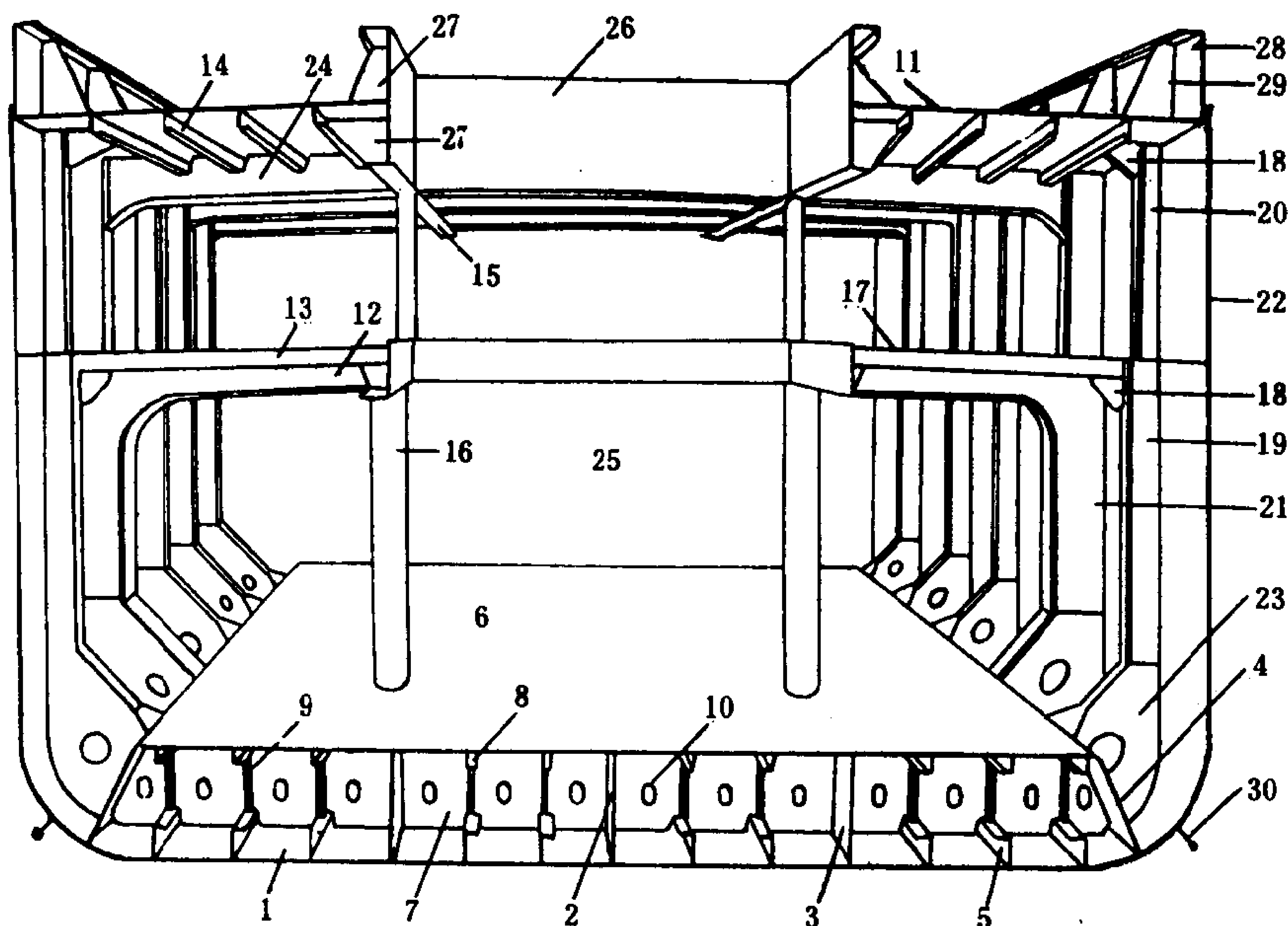


图 1.2.4-56　杂货船横剖面结构

1-船底板；2-中底桁；3-旁底桁；4-内底边板；5-船底纵骨；6-内底板；7-肋板；8-内底纵骨；9-加强筋；10-减轻孔；11-上甲板；12-强横梁；13-横梁；14-甲板纵骨；15-甲板纵桁；16-支柱；17-下甲板；18-梁肘板；19-舱内肋骨；20-甲板间肋骨；21-强肋骨；22-舷侧外板；23-舭肘板；24-舱口端横梁；25-横舱壁；26-舱口围板；27-肘板；28-舷墙；29-扶强肘板；30-舭龙骨

双桨双舵船：$v_R \approx 1.2v_S$。

螺旋桨与舵不在同一直线上时：

$$v_R = (0.68 \sim 0.72)v_S \qquad (对于中舵)$$

$$v_R = (0.78 \sim 0.84)v_S \qquad (对于边舵)$$

8 钢船结构

8.1 钢船结构的组成与构件名称

现代钢船都是由板和骨架两部分组成的。板的作用首先是封闭船体，组成船舶的排水容积，同时参与保证船体的强度和刚度；骨架的作用在于保证船体的强度，同时能有效地减轻船体的重量。钢船结构的构件名称如图 1.2.4-56 所示。

8.2 钢船骨架形式的种类

根据骨架中纵横构件的排列方式不同，船体骨架可分为 3 种基本类型：（1）纵骨架式：纵向构件密集，有利于保证纵强度，多用于大型船舶和军舰；（2）横骨架式：横向构件密集，有利于保证横强度，一般只应用于小型船舶和辅助船只；（3）纵横骨架式．界于上述两种骨

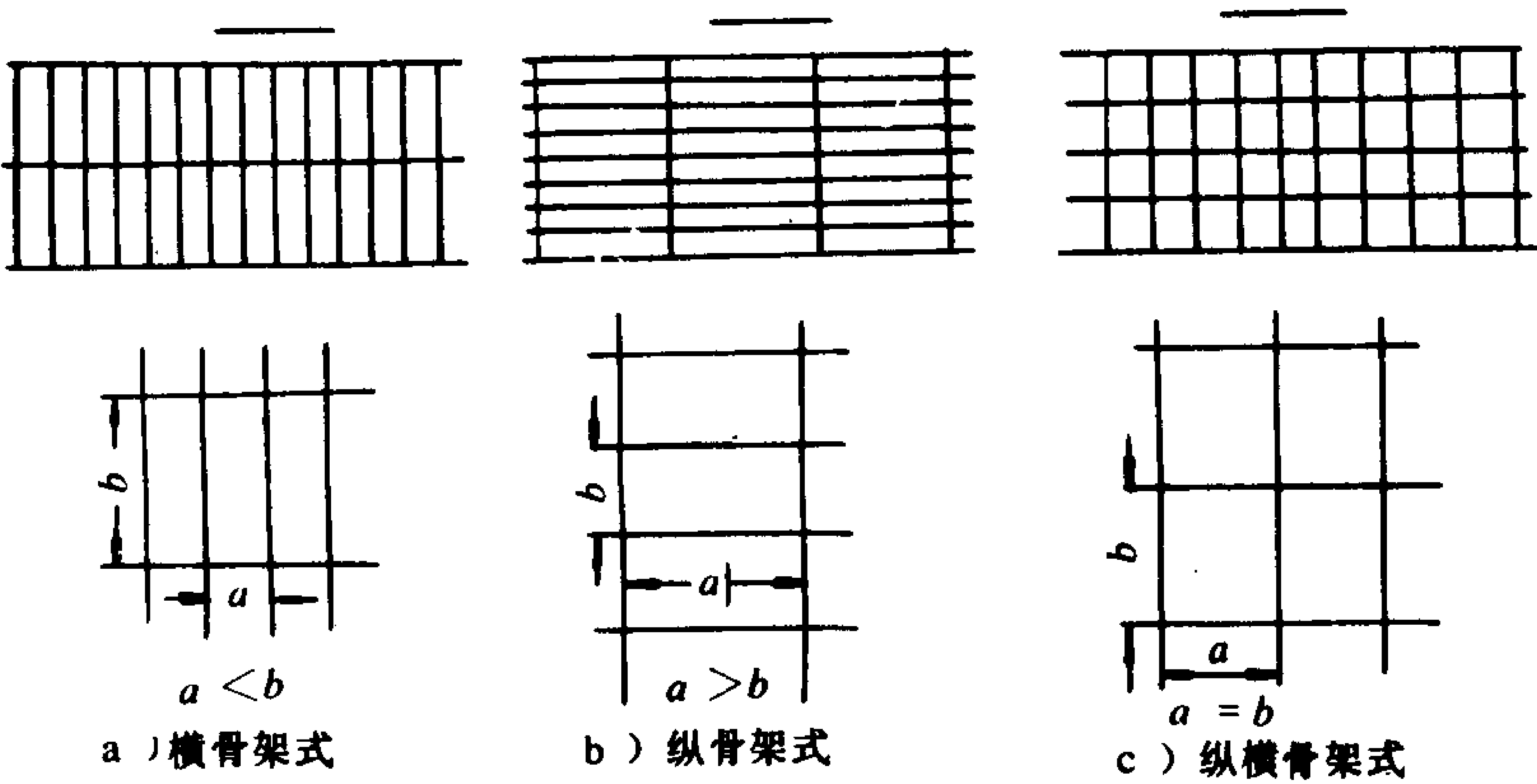


图 1.2.4-57　船体骨架形式的种类

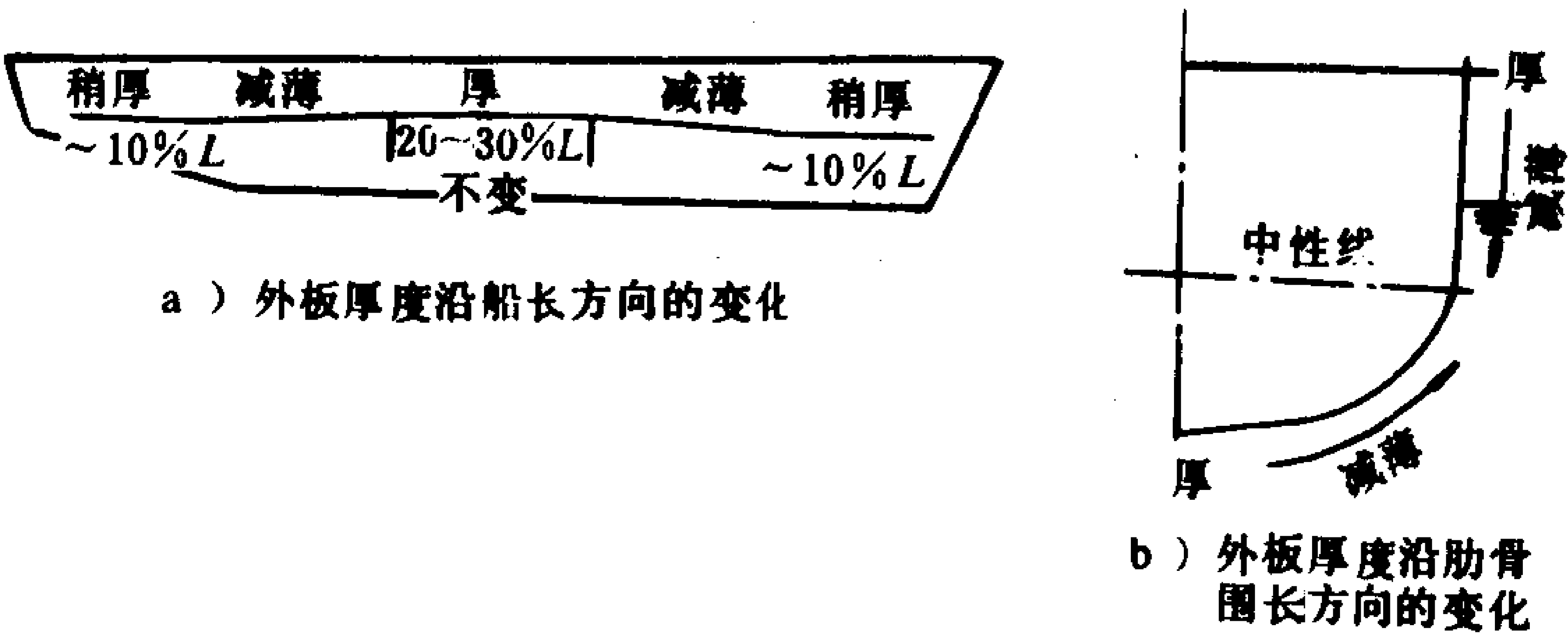


图 1.2.4-58　外板厚度变化

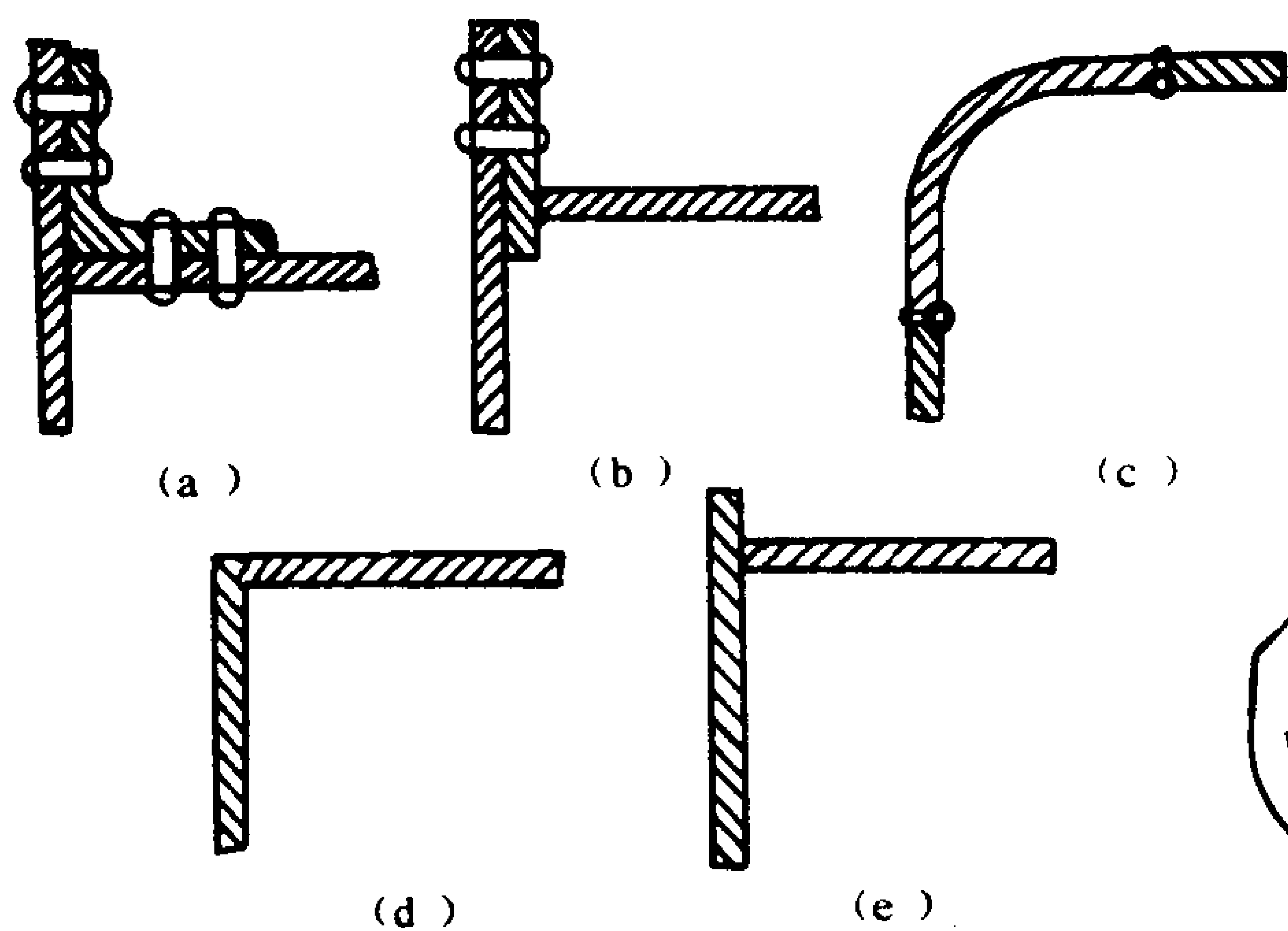


图 1.2.4-59　舷边连接

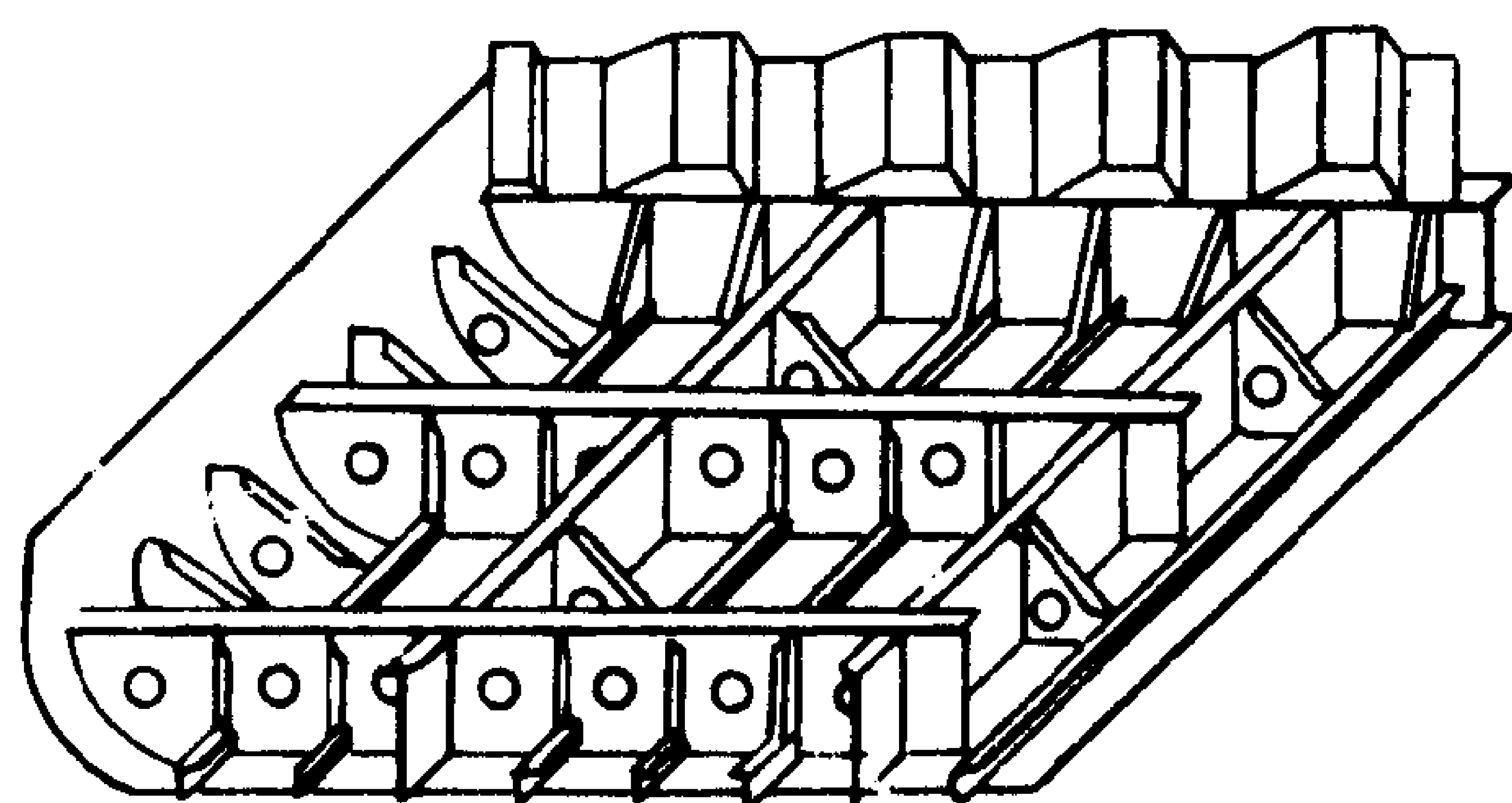


图 1.2.4-60　纵骨架式单底结构

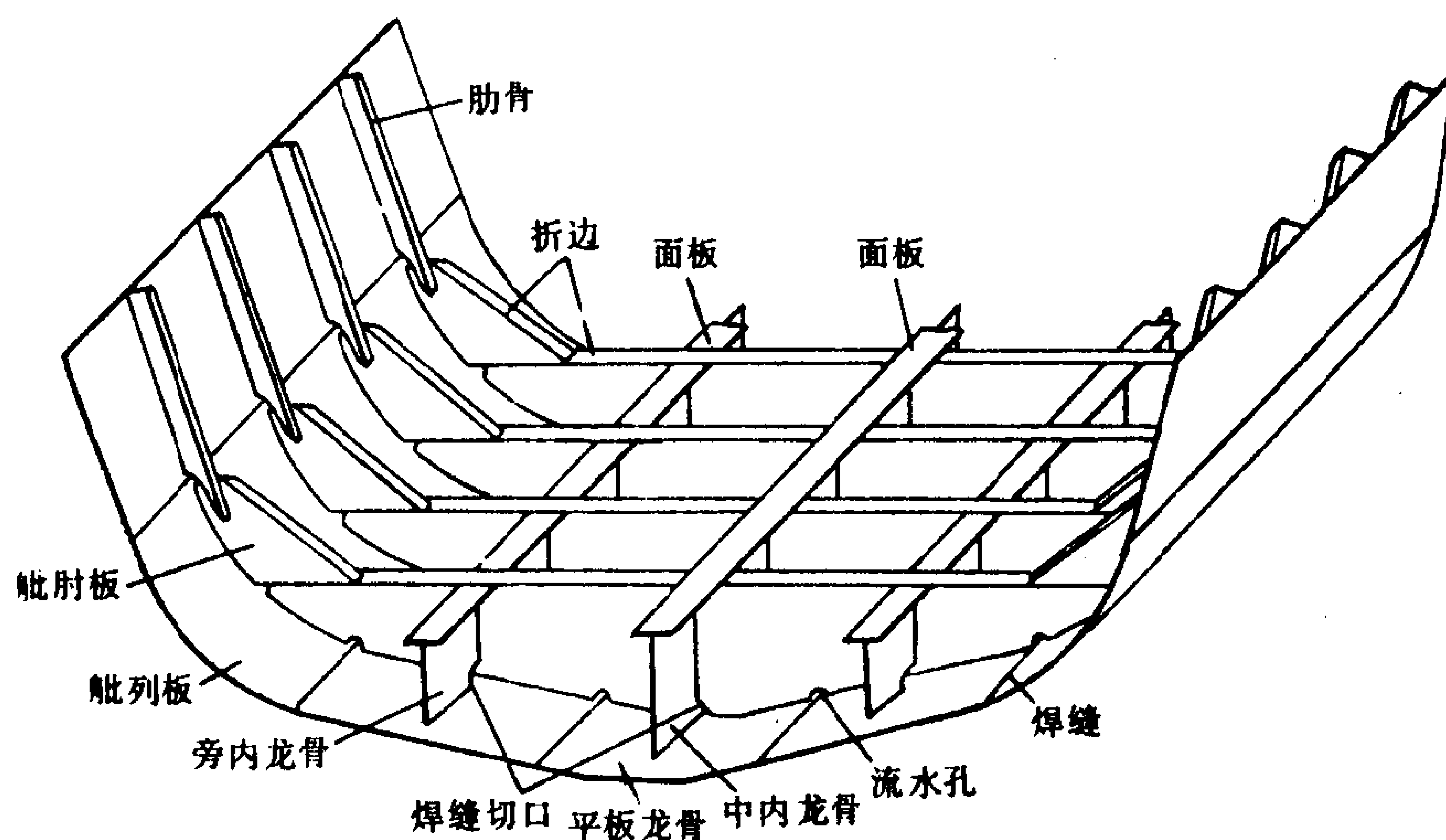


图 1.2.4-61　横骨架式单底结构

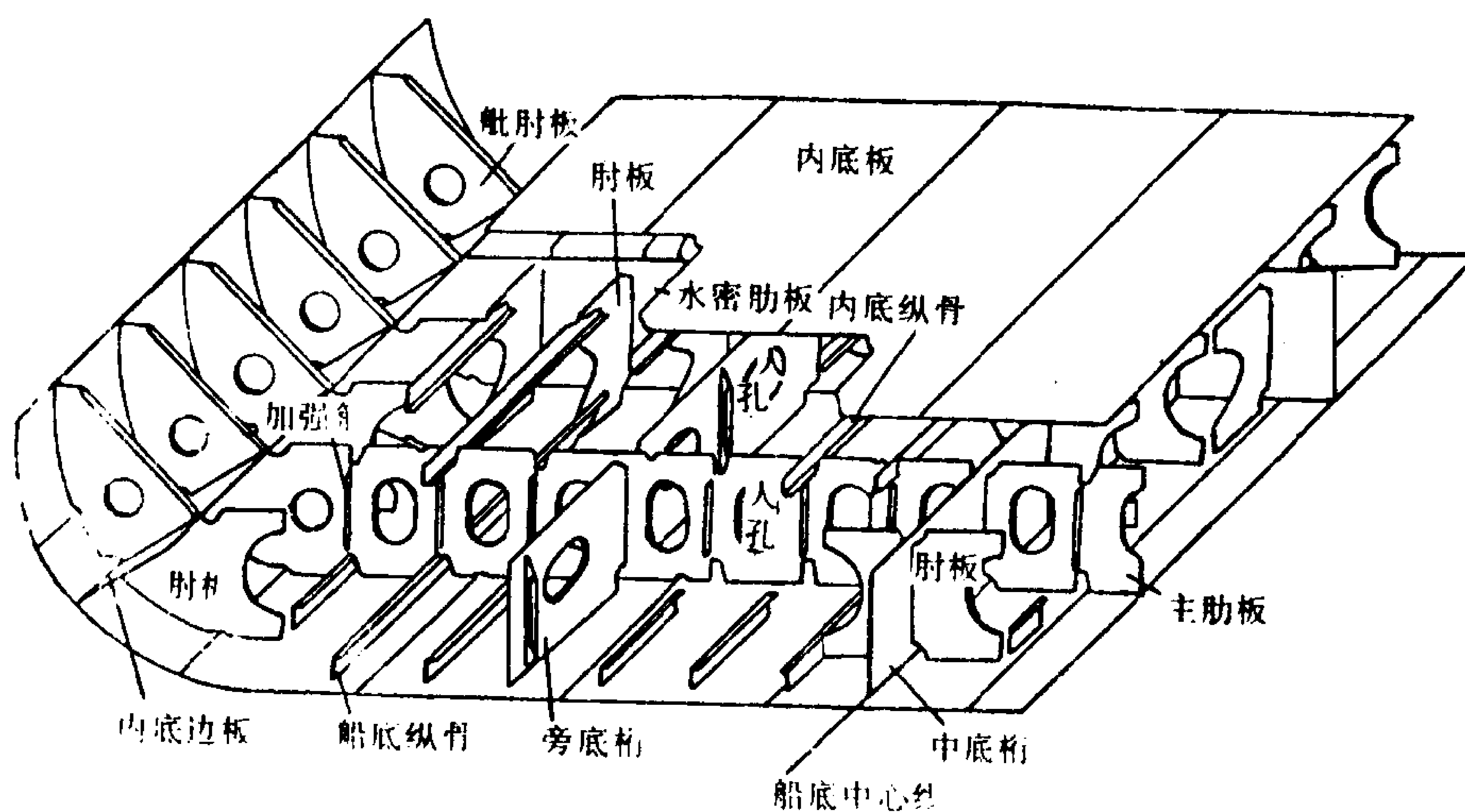


图 1.2.4-62　纵骨架式双层底结构

架式之间，通常用于机炉舱区域和某些船舶的首尾端。如图 1.2.4-57 所示。若在船体的不同部位采用不同的骨架形式，则整个船体称为混合式骨架。

8.3 船体外板

因为船体的总纵弯矩是中部最大，向首尾逐渐减小，但首尾端的局部水压力较大；在船

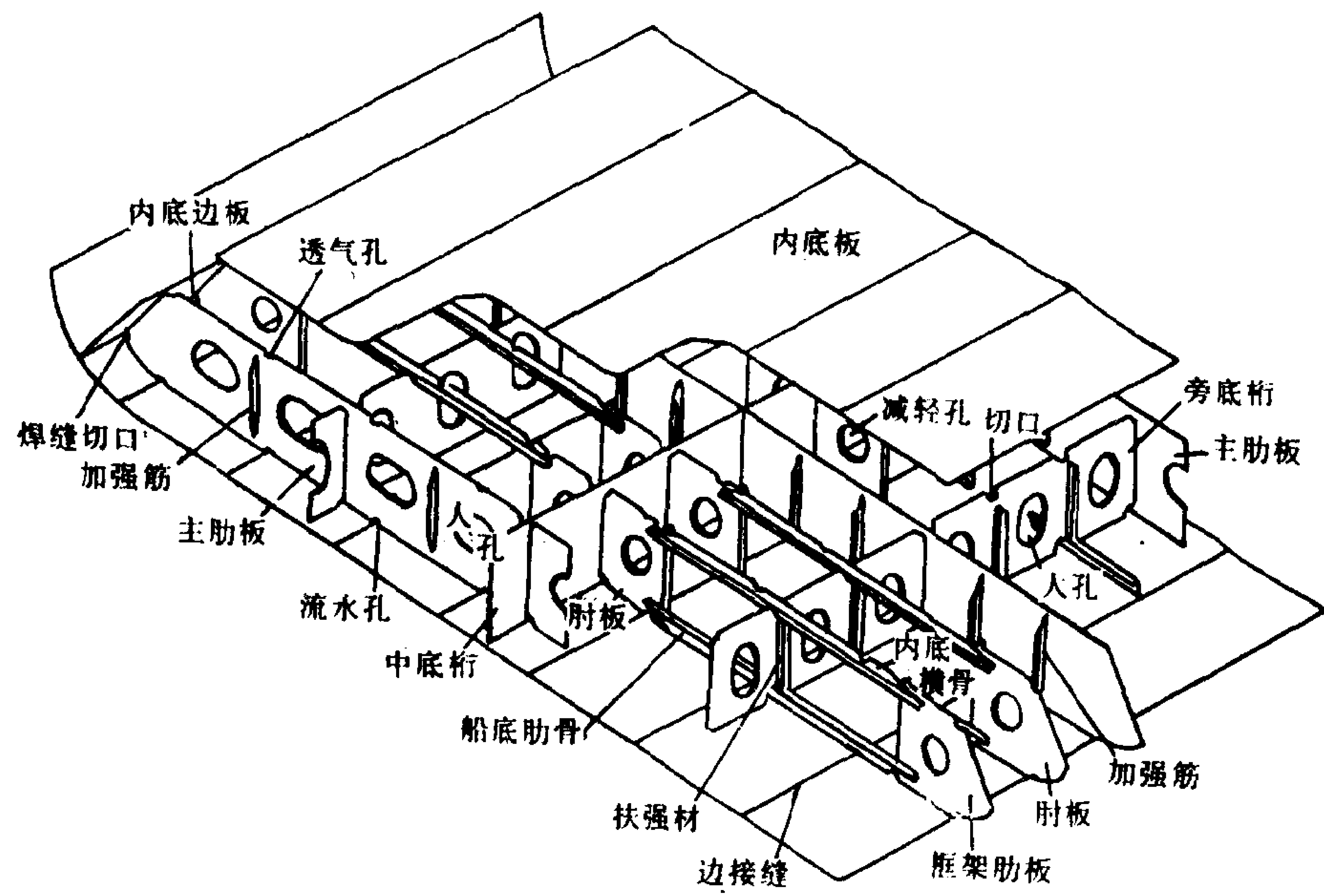


图 1.2.4-63 横骨架式双层底结构

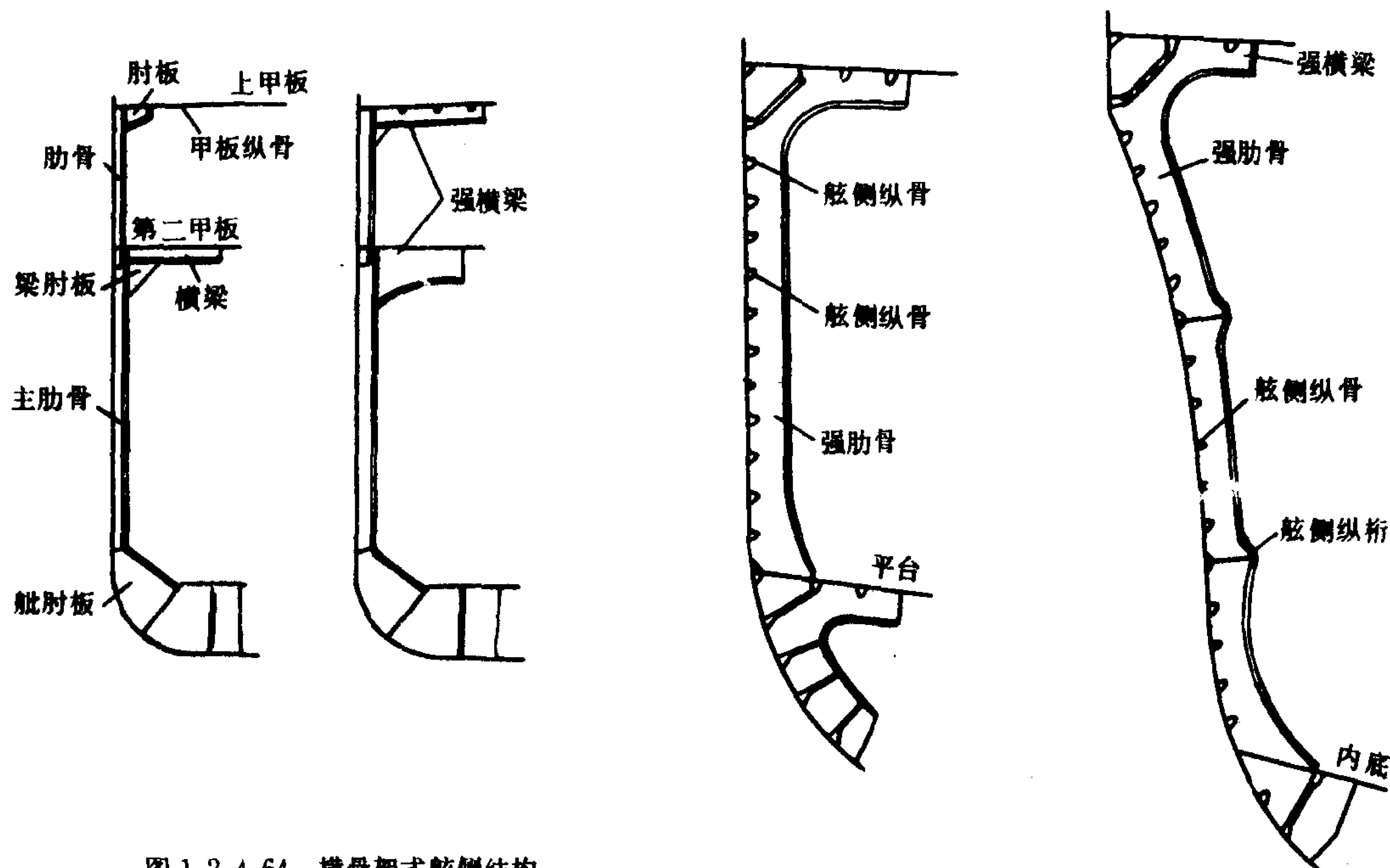


图 1.2.4-64 横骨架式舷侧结构

图 1.2.4-65 纵骨架式舷侧结构

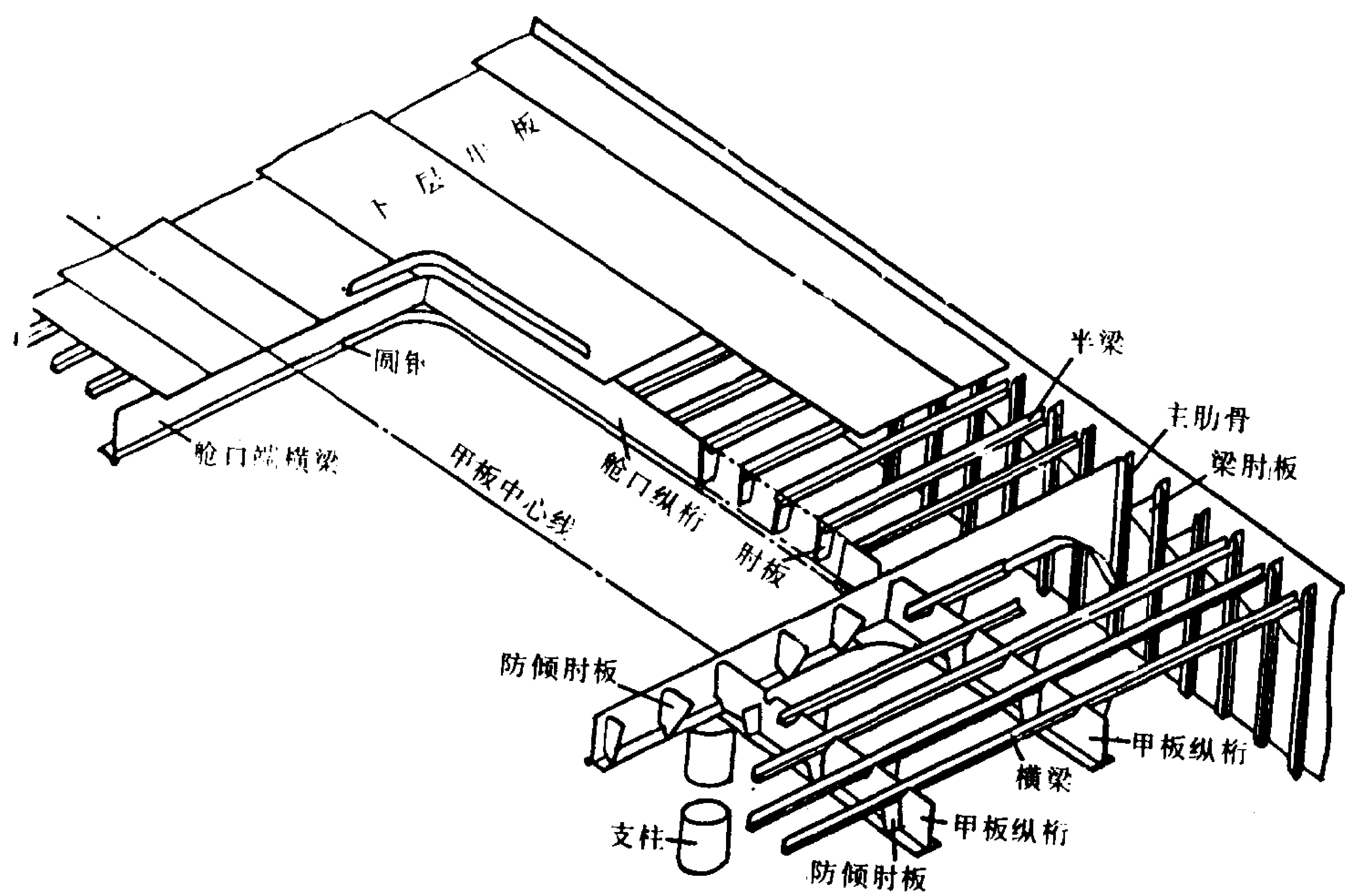


图 1.2.4-66 横骨架式甲板结构（下甲板）

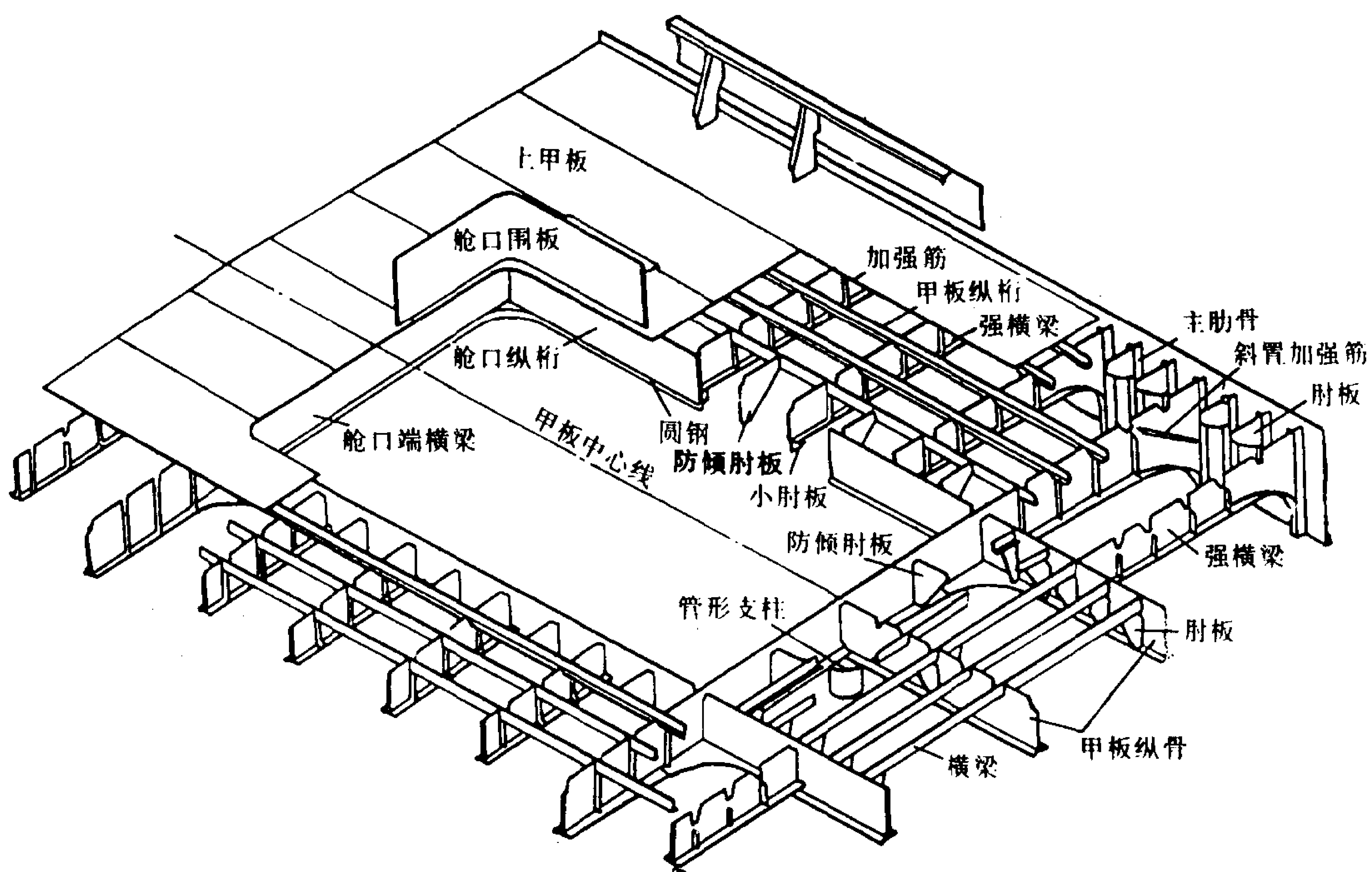


图 1.2.4-67 纵骨架式甲板结构（上甲板）

体横剖面，由于总纵弯曲应力是距中和轴最远的甲板和船底最大，向中和轴靠拢则减小，故船体外板厚度变化有如图 1.2.4-58 所示的规律性。

在局部载荷突出的部位和因开口而使船体强度受到削弱的地方，应进行局部加强。加强的方法是加厚原来的钢板或加双层板。

甲板板与舷板的连接有如图 1.2.4-59 所示的 3 种形式。

铆接的形式有利于阻止裂纹的横向扩展，以前大船上多用，但铆接工作量大，施工麻烦，属于比较落后的形式；焊接的形式施工简便，广泛的应用于中、小型船舶上；圆弧连接的优点能使甲板和舷侧的应力顺利过渡，并可增大板的刚性，是一种新的连接形式，但目前应用的还不多。

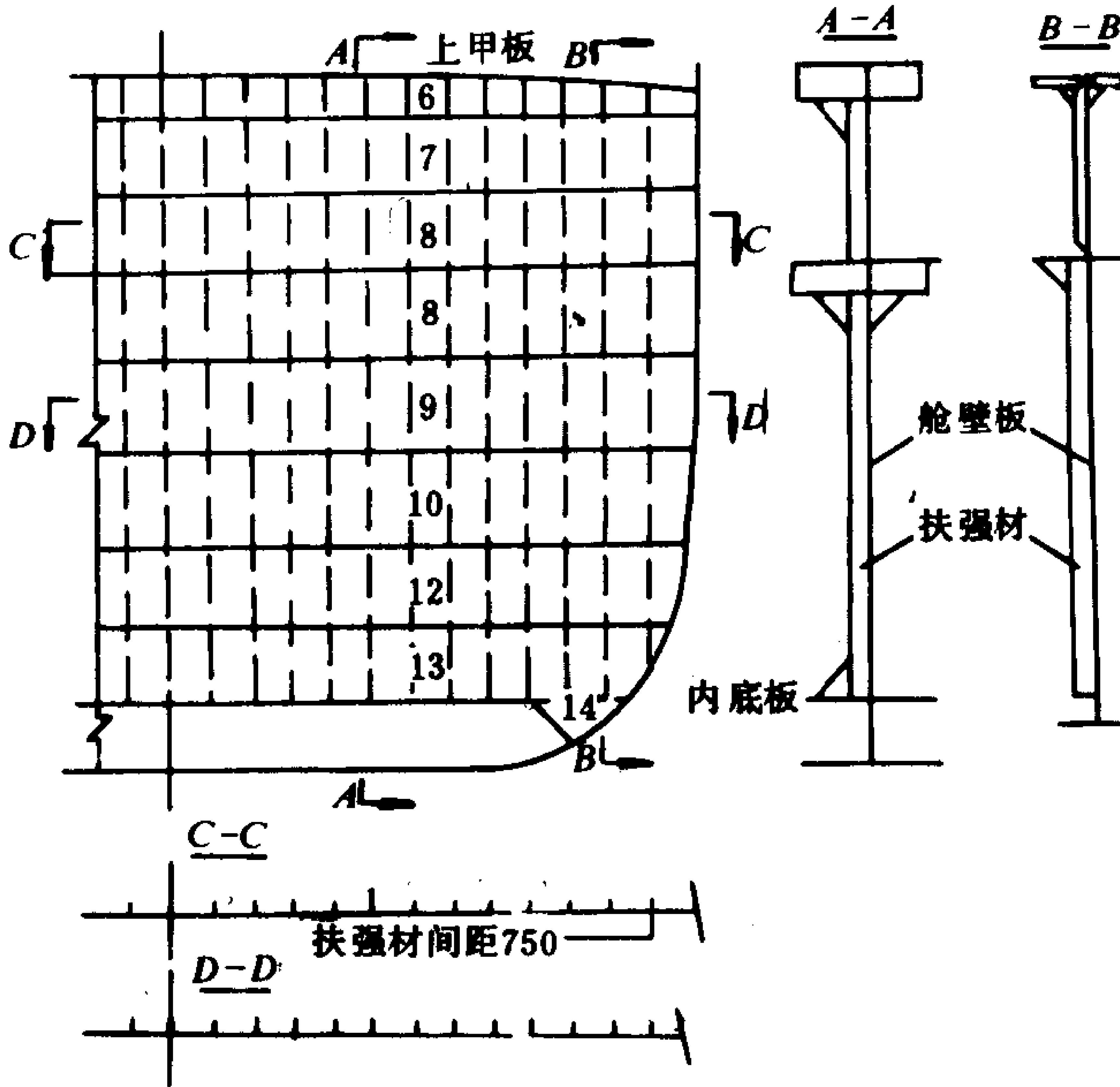


图 1.2.4-68 水密平面舱壁结构

8.4 船底结构

船底结构是整个船舶的基础，是保证船体强度的重要组成部分。根据船舶大小和外力性质不同，底部结构有单底和双底，横骨架式和纵骨架式之分。如图 1.2.4-60 至图 1.2.4-63 所示。

8.5 舷侧结构

舷侧结构相当于房屋的墙壁，是组成船体不可缺少的部分，并参与保证船体的足够强度和刚度。舷侧结构如图 1.2.4-64 和图 1.2.4-65 所示。

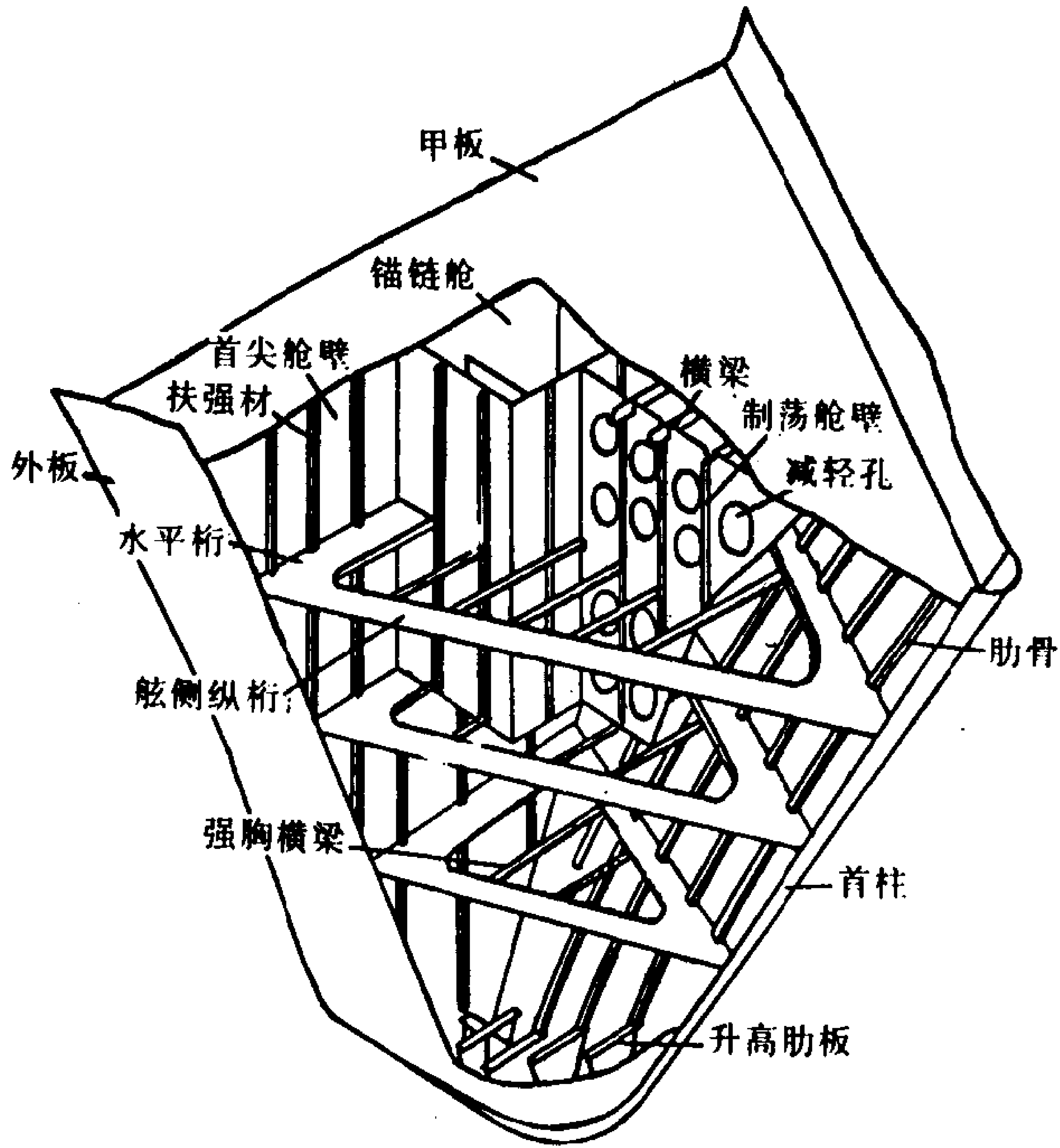


图 1.2.4-69 首端结构

8.6 甲板结构

甲板结构从上面覆盖船体或将船体内部空间分层，参与保证船体的足够强度和刚度，是船体的重要组成部分。如图 1.2.4-66 和图 1.2.4-67 所示。

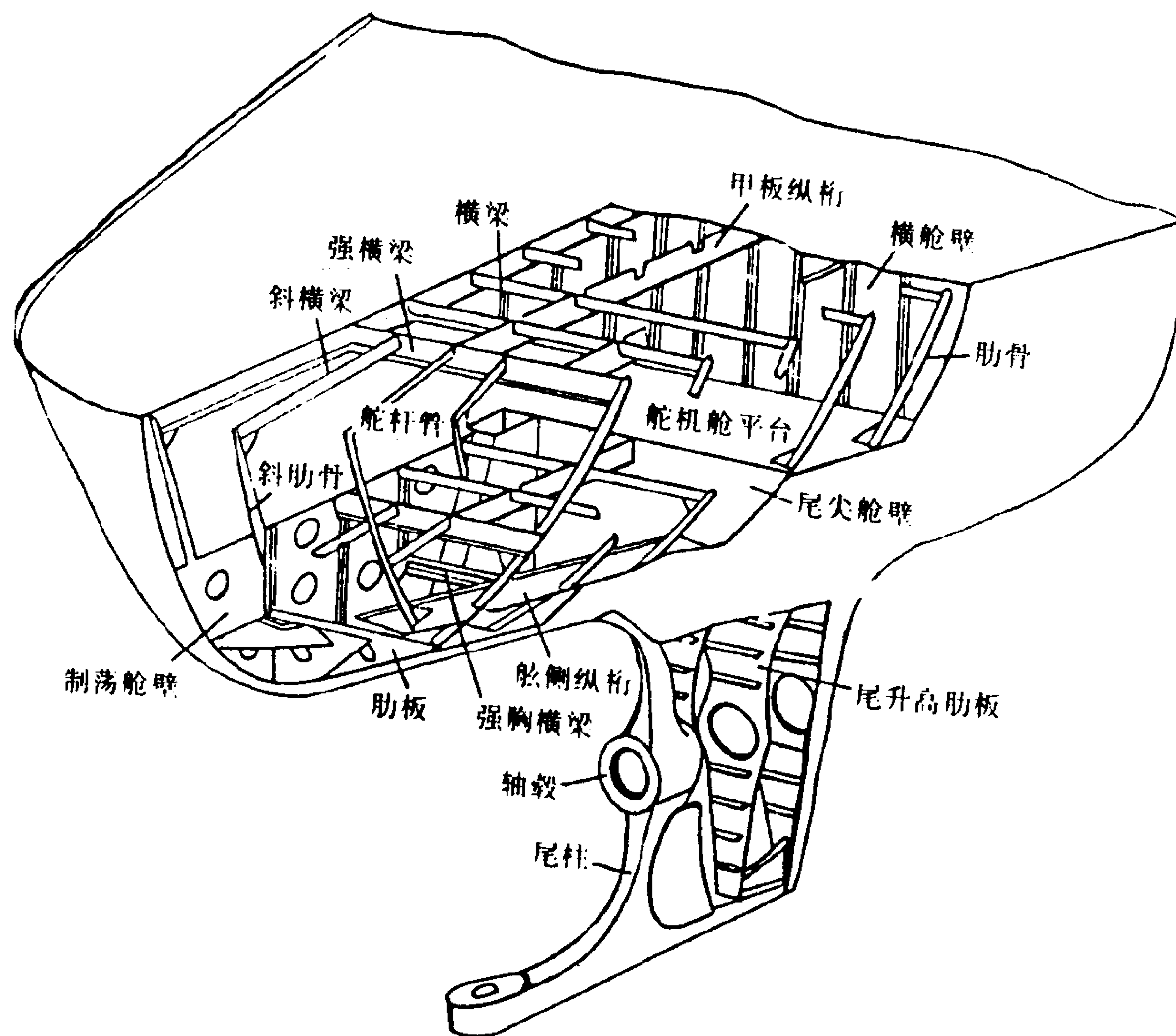


图 1.2.4-70 巡洋舰型尾端悬伸部结构

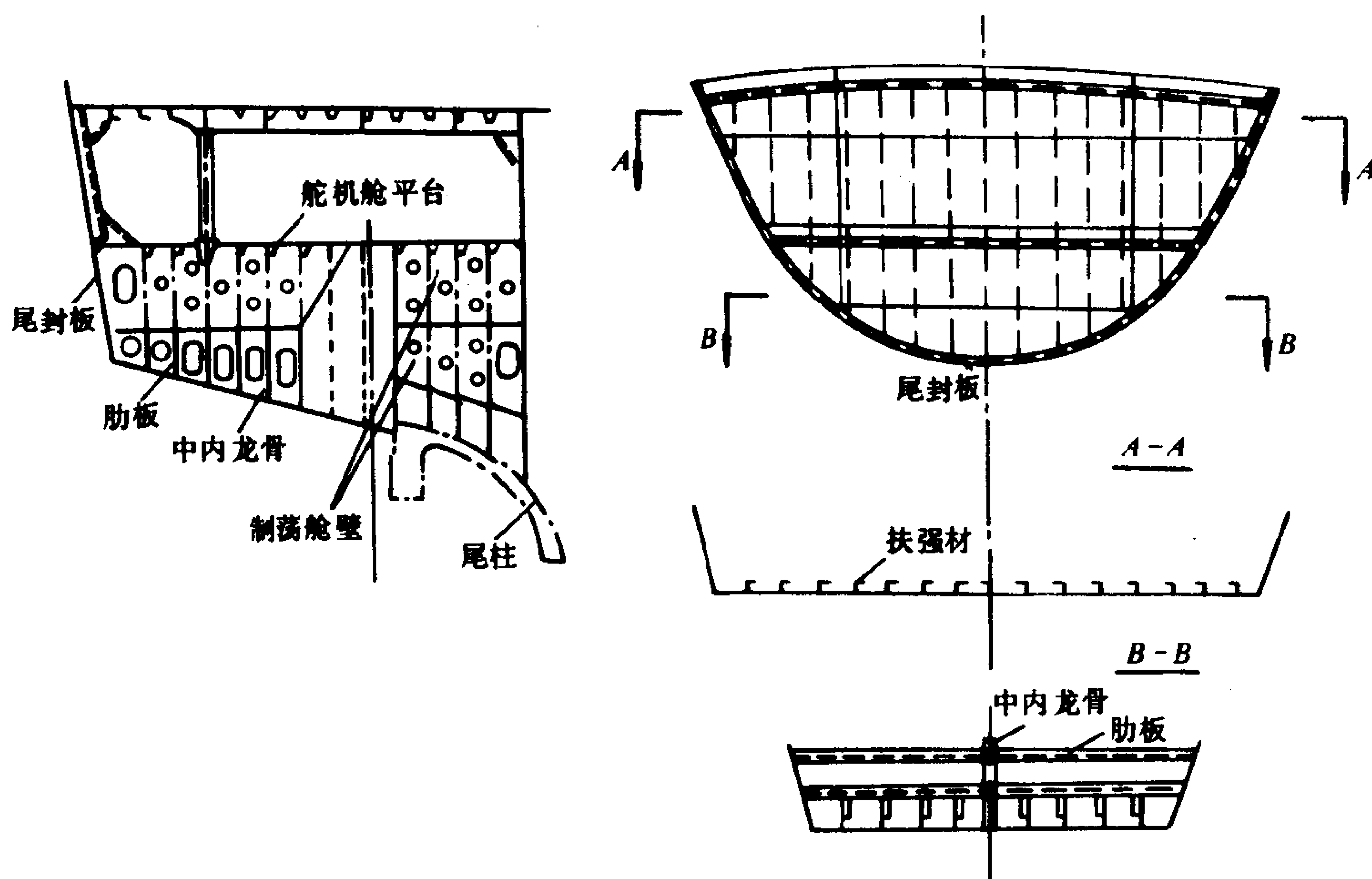


图 1.2.4-71 方型尾端结构

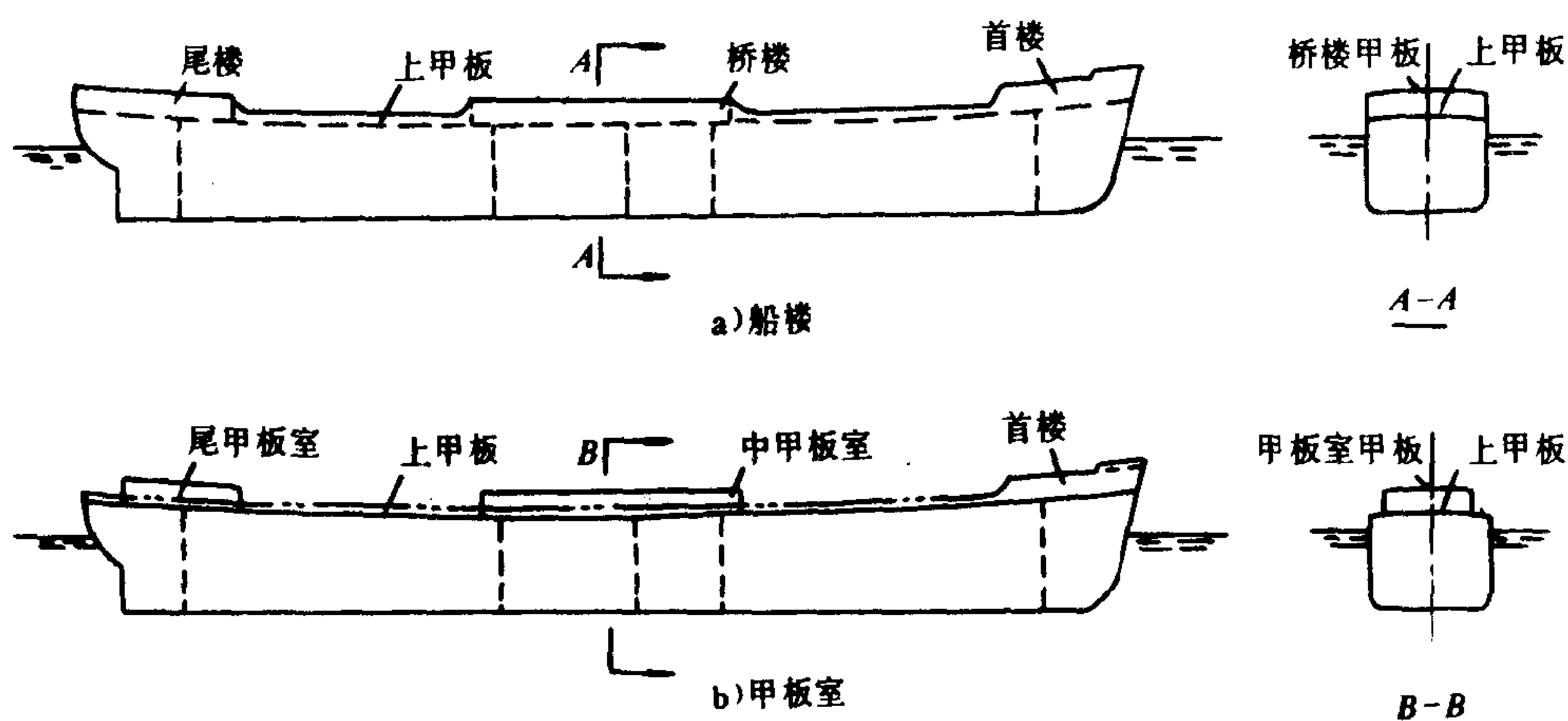


图 1.2.4-72 船楼和甲板室

8.7 舱壁结构

船体内部设置舱壁的目的是：分隔船体内部空间；保证船体的抗沉性；增强船体强度；并防止火灾在舱内蔓延。

舱壁有纵舱壁和横舱壁之分，它们都是由钢板和扶强材所组成。如图 1.2.4-68 所示。

8.8 首尾端部结构

船舶首部线型比较尖瘦，承受的外力主要是波浪冲击力和首倾时的静水压力以及碰撞等横向载荷，所以首部多采用横骨架式结构。如图1.2.4-69所示。

船舶尾部有巡洋舰式船尾和方尾两种形式，其结构如图 1.2.4-70和图 1.2.4-71 所示。

8.9 上层建筑

船舶上甲板以上的围蔽建筑物，统称为上层建筑。其中宽度与甲板同宽或侧壁板距舷边的距离小于 4％船宽的上层建筑称为船楼，依所在位置不同又分为首楼、桥楼和尾楼。不符合上述条件的上层建筑称为甲板室。如图 1.2.4-72 所示。

从强度方面来分，当上层建筑长度较长，能够完全参加船体总纵弯曲的，称为坚固上层建筑，反之称为轻型上层建筑。

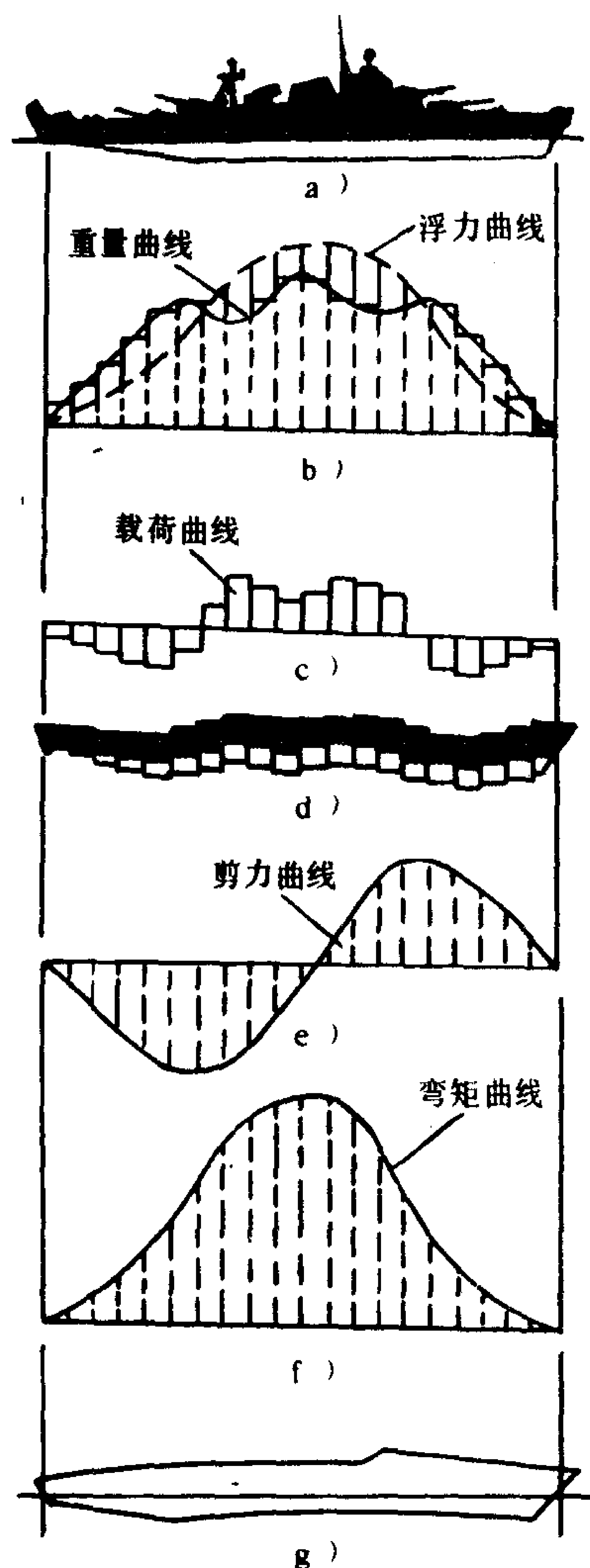


图 1.2.4-73 舰船在静水中的浮力、重量、载荷、剪力和弯矩曲线

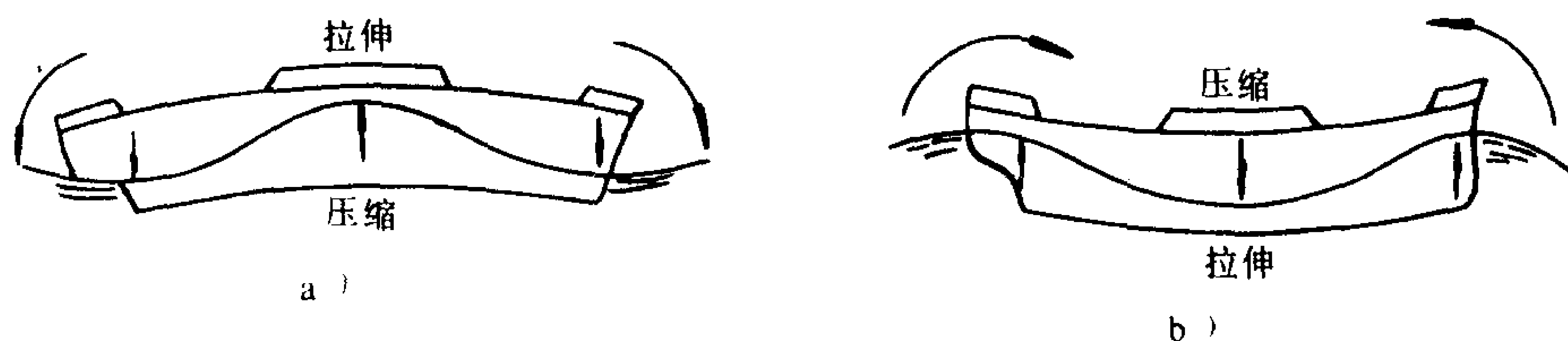


图 1.2.4-74

a）中拱；b）中垂

9 船体强度概念

9.1 船体强度的种类

船体强度可分为总纵强度、局部强度和扭转强度 3 大类。

总纵强度——船体作为一根空心变断面梁，抵抗总纵弯曲变形的能力，称为总纵强度。

局部强度——船体结构中部分结构或某个构件承受局部载荷的能力，称为局部强度。

扭转强度——当船舶斜置在波浪上或货载分布不对称中线面，船体将产生扭转变形，船体抵抗扭转变形的能力，称为扭转强度。

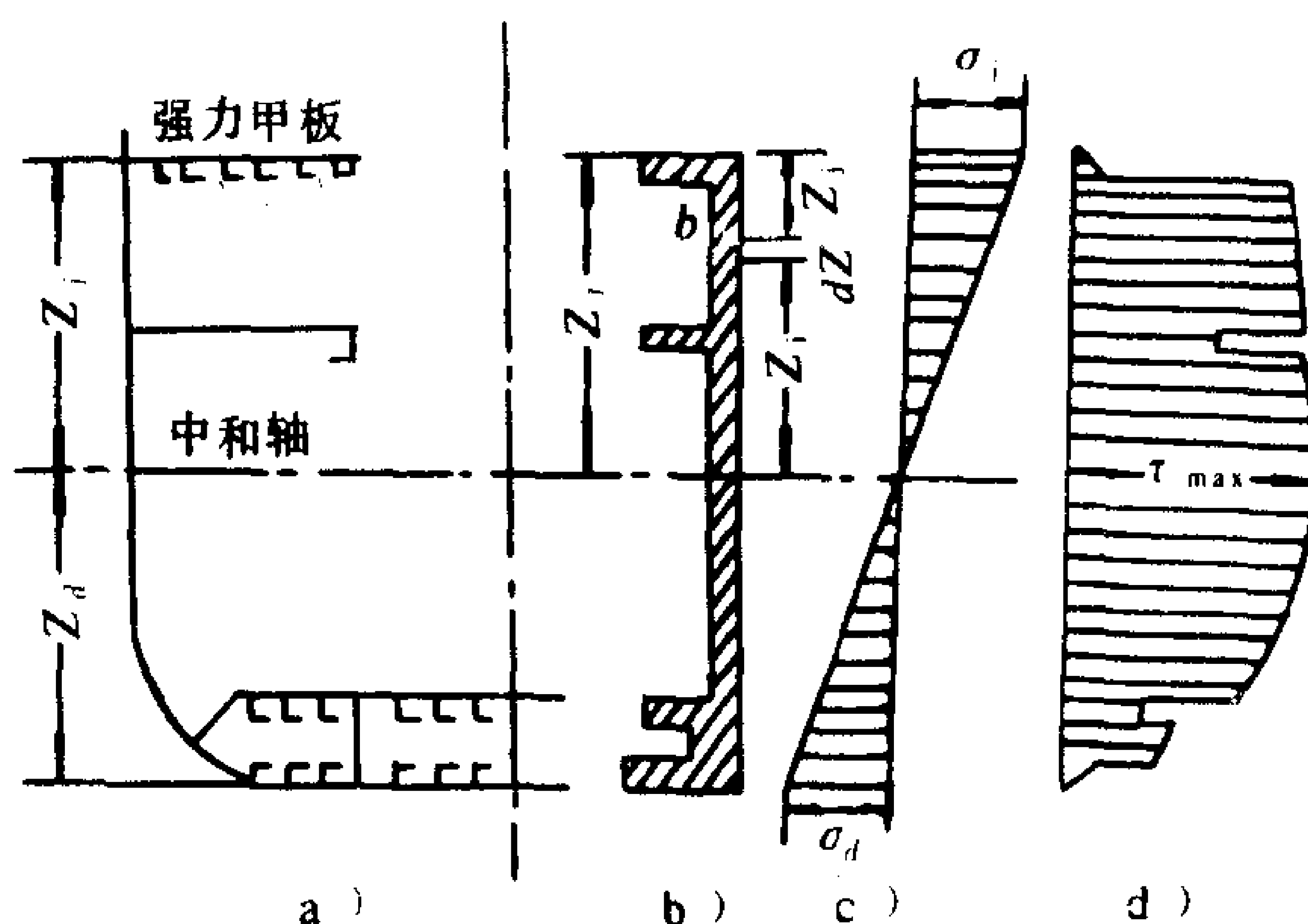


图 1.2.4-75 船体剖面的应力分布

a)中横剖面；b)等值梁；c)弯应力；d)剪应力

9.2 船体总纵弯曲力矩和剪力计算

9.2.1 船体纵弯曲变形的产生

作用于船体上的重力和浮力，由于沿船长方向的分布不一致，使船体受到与其纵向轴线相垂直的分布载荷的作用，所以船体将产生纵向弯曲变形。同时在船体的横剖面产生剪力和弯矩。如图 1.2.4-73 所示。

当船体出现中部上拱，首尾下垂的纵向弯曲状态时，称为中拱；当船体出现中部下垂，首尾上翘的纵向弯曲状态时，称为中垂。如图 1.2.4-74 所示。

9.2.2 总纵弯矩和剪力的计算方法

首先，将船长分成 20 个等分的分段，在每一个分段内，假定重量是均匀分布的，做成阶梯形重量曲线。对于每一分段内的浮力也同样处理，做成阶梯形浮力曲线。然后求出每一段的载荷，做出阶梯形载荷曲线。最后用梯形法则或其他近似法则对载荷沿船长进行近似积分，从而得到剪力曲线和弯矩曲线。如图 1.2.4-75 所示。由图可见，最大剪力一般发生在四分之一和四分之三船长处；最大弯矩则发生在船中附近。

9.2.3 影响剪力和弯矩的因素

重力分布的影响：当船舶漂浮于静水面时，由于船体中部的线型肥满，所以受到的浮力较大，而首尾端部由于线型尖瘦，所以受到的浮力较小，因此，若船中附近装载较大的重量，而首尾端部装载较小的重量，则可以减小作用于船体的载荷，从而可以从根本上降低船体结

构所承担的剪力和弯矩。

浮力分布的影响：给定重力曲线，改变浮力曲线，考查它对剪力和弯矩的影响，这里主要有两个方面，一是波长的影响，二是波位的影响。理论计算和实测结果都表明，当波长等于船长时，将产生最大的剪力和弯矩；如果波峰（波谷）沿船长方向变化，则当波峰（波谷）位于船中时，将有最大的中拱弯矩(中垂弯矩)。总之，当波长等于船长，波峰或波谷位于船中，对于剪力和弯矩是最不利的浮力分布状态。

9.2.4 计算状态的选择

船舶在营运过程中，其装载情况以及在海面上遇到的波浪都极为复杂。因此，不可能也没有必要对所有情况都进行计算，而只能选择最危险的波浪和最不利的几种装载状态作为计算状态。

1)标准波：波浪的大小、形状以及相对于船舶的位置，对船体的总纵弯曲影响很大，根据实测和理论分析，得到船体强度计算时，应采用的标准波要素如下：

波形——坦谷波

$\lambda = L$　　λ——波长；L——船长

波高h取：

当$\lambda \geq 120$ m时　　$h = \frac{\lambda}{20}$ m

当$\lambda < 120$ m时　　$h = \frac{\lambda}{30} + 2$ m

计算时，将船中静置于标准波的波峰或波谷上，称为标准状态。

2)装载状态：船舶营运过程中，需要进行纵强度校核的最不利的装载状态是：

(1)满载出港——对中机货船，当油、水舱位于首尾，取中拱为计算状态，对尾机船，当油、水舱靠近中部，取中垂为计算状态。

(2)满载到港(剩10%燃料)——对中机货船，当油、水舱位于中部，取中拱为计算状态，对油船和尾机货船，取中垂为计算状态。

(3)压载航行——对尾机船，当首尾加压载时，取中拱为计算状态；对中机船，当中部深舱作压载用时，取中垂为计算状态。

9.3 船体横剖面弯应力计算和总纵强度校核

9.3.1 船体横剖面弯应力计算

需要进行船体总纵强度校核的横剖面，应选在纵弯矩较大且船体结构又比较薄弱的部位，船体中部具有最大的纵弯矩，而且由于甲板开口的存在使船体强度受到一定的削弱，故中横剖面常被选为纵强度校核剖面。根据直梁弯曲理论，在校核剖面处的弯应力为：

$$\sigma = M \cdot Z_i / I \tag{1.2.4-70}$$

式中：σ——校核剖面距中和轴为Z_i处的弯应力，N/mm²；

M——校核剖面的总纵弯矩，kN·m；

I——校核剖面的剖面惯性矩，cm²·m²；

Z_i——校核点距中和轴距离，m。

可见横剖面总纵弯曲应力距中和轴愈远愈大，如图1.2.4-75所示。甲板和船底具有最大的到中和轴的垂距，因此，船体总纵强度校核时应取$Z_i = Z_j$和$Z_i = Z_d$（Z_j、Z_d分别为甲板和

船底到中和轴的垂距），这样，船体总纵强度校核时的弯应力为。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_j=\frac{M}{I/Z_j}=\frac{M}{W_j}\\ \sigma_d=\frac{M}{I/Z_d}=\frac{M}{W_d}\end{aligned}\right\} \quad (1.2.4\text{-}71)$$

式中：σ_j（σ_d）——校核剖面甲板（船底）处总纵弯曲应力，N/mm²；

Z_j（Z_d）——校核剖面强力甲板边线（平板龙骨上表面）至中和轴的垂距，m；

W_j（W_d）——甲板（船底）剖面模数，cm²·m。

9.3.2 等值梁剖面模数计算

与船体梁具有相同剖面模数的实心梁称为船体的等值梁。因此，等值梁剖面模数计算就是船体梁的剖面模数计算。

欲求等值梁的剖面模数，须先求出等值梁的剖面惯性矩，等值梁的剖面惯性矩一般以表格的形式进行计算，见表 1.2.4-18。因为船体左右对称，故计算时取半个剖面进行，最后将计算结果加倍，计算时比较轴的位置通常取在距基线 0.45～0.5H（型深）处。

表 1.2.4-18　　等值梁剖面要素计算表

构件序号	构件名称	面积 F，cm²	力臂 Z，m	静力矩 FZ，cm²·m	移轴惯性矩 FZ^2，cm²·m²	自身惯性矩 i，cm²·m²
1						
2						
3						
4						
⋮						
⋮						
n						
	Σ	A=		B=	C=	

根据表格计算结果，最后求得比较轴到中和轴的距离为：

$$e=B/A \quad \text{m} \quad (1.2.4\text{-}72)$$

经移轴后，并考虑到整个剖面，则等值梁的剖面惯性矩为：

$$I=2(C-B^2/A) \quad \text{cm}^2\cdot\text{m}^2 \quad (1.2.4\text{-}73)$$

由此即可算出甲板和船底的剖面模数 W_j、W_d，按公式 1.2.4-71 即可算出船体总纵强度校核时的弯应力 σ_j、σ_d。

9.3.3 腐蚀对剖面模数的影响

随着时间的推移，上述船体纵向连续构件因被腐蚀而不断减小几何尺度，从而相应地减小其剖面模数，σ_j和σ_d将随之增大，使船体的总纵强度不断下降。因此，经常掌握剖面模数下降的情况，可以监督船体总纵强度的变化

船舶经过n年营运后，因腐蚀而下降后的船体剖面模数可用下式计算。

$$W_C=W(1-Kn) \quad \text{cm}^2\cdot\text{m} \quad (1.2.4\text{-}74)$$

式中：　W_C——船体因腐蚀下降后的剖面模数，cm²·m；

W——新船时的剖面模数，cm²·m；

$K=\Delta W/W$——剖面模数因腐蚀的下降率；

ΔW——每年因腐蚀而降低的剖面模数，cm²·m。

根据统计资料，各船的平均值，甲板$K=\frac{\Delta\omega}{\omega}=0.458\%$，船底$K=\frac{\Delta W}{W}=0.480\%$，考虑到远洋的腐蚀情况较沿海严重，上海船舶运输科研所提出万吨级远洋货船，甲板$K=0.6\%$，船底$K=0.7\%$。

关于船体剖面模数的腐蚀极限，我国《营运船舶检验规程》规定：$L\geq 60$ m的海洋干货船，$L\geq 90$ m的海洋油船，在船中40%L区间，强力甲板的剖面模数应满足：

Ⅰ类航区——$W_C\geq 0.9\omega$;

Ⅱ类航区——$W_C\geq 0.84\omega$;

Ⅲ类航区——$W_C\geq 0.8\omega$。

9.3.4 许用应力的确定与总纵强度衡准

造船工程中的许用应力通常取为材料屈服应力的一半，即

$$[\sigma]=0.5\sigma_s \quad \text{N/mm}^2 \tag{1.2.4-75}$$

式中：$[\sigma]$——许用应力，N/mm^2；

σ_s——材料屈服应力，N/mm^2。

当许用应力确定后，船体总纵强度的衡准按下式进行：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_j=M/\omega_j\leq[\sigma] \quad \text{N/mm}^2\\ \sigma_d=M/\omega_d\leq[\sigma] \quad \text{N/mm}^2\end{aligned}\right\} \tag{1.2.4-76}$$

9.4 用《规范》方法校核船体总纵强度

这种方法，首先求出船体的实际剖面模数值，然后和《规范》规定的该船应具有的剖面模数值相比较，当实际剖面模数值大于规定值时，则认为船舶的总纵强度满足要求。

9.4.1 《规范》对船舶中剖面模数的要求

我国《钢质海船入级与建造规范》规定，当船长$L\geq 60$ m时，船体强力甲板边线的船体剖面模数W_j应不小于按下式计算之值。

$$W_0=KL^2B(C_b+0.7)\times 10^{-2} \quad \text{cm}^2\cdot\text{m} \tag{1.2.4-77}$$

式中：W_0——基本剖面模数，$\text{cm}^2\cdot\text{m}$；

$K=10.75-\left[\frac{300-L}{100}\right]^{3/2}$，当$L\geq 90$ m时；

$K=0.0412L+4$，当$L<90$ m时；

C_b——船舶在设计夏季载重水线下的方形系数，但不得小于0.60；

L——船长，m；

B——船宽，m。

但船长$L\geq 90$ m时，对强力甲板边线的船体中剖面模数W_j除应符合上述W_0的要求外，尚应不小于按下式计算之值

$$W=(M_S+M_W)/\sigma \quad \text{cm}^2\cdot\text{m} \tag{1.2.4-78}$$

式中：W——要求的中剖面模数，$\text{cm}^2\cdot\text{m}$；

M_S——剖面上的静水弯矩，$\text{kN}\cdot\text{m}$；

M_W——剖面上的波浪弯矩，$\text{kN}\cdot\text{m}$；

$\sigma=15$，但对油船和只有一个货舱的装载率$\gamma>1\ \text{t/m}^3$的散装干货船σ取为14.5。

对船底平板龙骨上表面的船体中剖面模数W_d不得小于$1.05W_j$。

9.4.2 《规范》对静水弯矩和波浪弯矩计算的规定

计算静水弯矩时，一般应以下述情况计算所得的最大值作为计算静水弯矩：

满载：出港；到港。

压载：出港；到港。

波浪弯矩可按下式求得：

$$M_W = CFL^2B(C_b+0.4)\times10^{-2} \quad kN\cdot m \tag{1.2.4-79}$$

式中：$C=9.81$

$F=4.71+4.45(L/100)-0.71(L/100)^2$；

C_b——同 1.2.4-77 式；

L——船长，m；

B——船宽，m。

此外，《规范》还规定，对于船长等于或大于 90 m的船舶，且装载不均匀，或具有两道或两道以上纵舱壁时，应进行剪切强度校核，具体方法见《规范》。

9.5 配载对船体强度的影响

9.5.1 配载对总纵强度的影响

船体受到的总纵弯曲力矩的大小，取决于载荷的大小，而载荷产生的根本原因是重力和浮力沿船长方向的分布不一致，两者的分布相差愈悬殊则载荷愈大，所以，同样的货载，分配的好坏，对总纵强度的影响是很大的。比例配载法是保证船体纵强度简单而有效的一种方法，即各舱分配的货载按下式计算结果确定。

$$p=w\cdot Q/W \quad t \tag{1.2.4-80}$$

式中：p——某舱应分配的货物重量，t；

w——某舱舱容，m^3；

W——船舶的舱容总和，m^3；

Q——船舶载货重量总和，t。

此外，对于具体的船舶，尚应根据不同的船型，不同的装载状态，采取相应的措施，才能确保船舶的安全。表 1.2.4-19 是万吨级干货船在满载和压载航行中，采取的保证船舶安全的措施。

表 1.2.4-19

船型	满载航行	空船压载航行
中机船 （前三后二）	处于中拱状态，应采取降低中拱弯矩措施 （1）按舱容比分配货重，船中区货舱适当增加 5%～10% （2）中区深舱应装货 （3）油、水应自中区向船首装载，而使用应自船首尾舱向中区消耗 （4）中途港要卸的货物尽量分配在首尾货舱	根据船型布置，一般仍处于中拱状态（也可能产生中垂）但弯矩不大，应采取降低压载、弯矩措施。 （1）应自中区向首、尾压载 （2）油水的装载和使用同满载航行

船型	满载航行	空船压载航行
中后机船 （前四后一）	一般处于中拱状态，但小于压载中拱弯矩，可采取下列措施。 （1）按舱容比分配货物 （2）中区深舱应装货 （3）油、水的装载及使用同上	处于中拱状态，应采取降低中拱弯矩的措施。 （1）在航行条件允许情况下少用或不用首、尾舱压载 （2）尽量使用中区压载舱压载 （3）中区油、水交替舱在燃油消耗后尽量用海水压载 （4）油、水装载和使用同上
后机船	一般处于中拱状态，但也可能出现中垂。 措施同中后机船	处于中拱状态，应采取降低中拱弯矩措施， 措施同中后机船

9.5.2 配载对局部强度的影响

配载的好坏不仅影响到船舶的总纵强度，有时由于局部配载过大，也会造成局部强度不足，而导致船体的破坏。配载对局部强度的影响，主要涉及到上甲板、中间甲板、底舱及平台的承载能力。如果没有各层甲板单位面积允许负载的资料，则可按下列经验公式计算负载量。

1)上甲板（规定上甲板不许装货者除外）

$$P=S\cdot B\cdot h/\mu \quad \text{t} \tag{1.2.4-81}$$

式中：P——上甲板横梁间的允许负载量，t；

S——横梁间距，m；

B——船宽，m；

h——堆货高度，m，上甲板结构强者$h=1.5$m，弱者$h=1.2$m；

μ——该船设计时的舱容系数。

一般船舶，上甲板单位面积最大负载量P_d不得超过1.5 t/m²。

2)中间甲板或舱底

$$P=H/\mu \quad \text{t/m}^2 \tag{1.2.4-82}$$

式中：P——中间甲板或舱底的单位面积负载，t/m²；

H——舱高，m；

μ——该船设计时的舱容系数（如按货舱充满水，强度不受影响，则：$\mu=1\ \text{m}^3/\text{t}$）。

对一般船舶而言，中间甲板及舱底的单位面积负载P即等于Ht/m²。

另外，需要指出，对一些舱长较长，甲板腐蚀严重而厚度相对减薄，以及具有较大变形者，其承载能力就要相应下降，在实际使用过程中，需根据具体情况灵活掌握。

9.6 局部强度

局部强度是指船体的局部结构（如底部板架、舷侧板架、甲板板架、舱壁板架、肋骨框架、船体构件等）在外载荷作用下的强度问题。设计时计算载荷通常是按《规范》的规定选取的。因此，在营运中局部结构上承受的荷重不能超过《规范》规定的要求。我国《钢质海船入级与建造规范》对于一些结构所规定的计算荷重如下：

9.6.1 露天强力甲板计算水柱高

露天强力甲板计算水柱高h，应满足下列不等式：

$$\left.\begin{aligned}&h \geq h_0 = 1.20 + \frac{2}{1000}\left(\frac{100+3L}{D-d} - 150\right) \quad \text{m}\\&1.20 \leq h \leq 1.50\end{aligned}\right\} \qquad (1.2.4\text{-}83)$$

式中：L——船长，m；

D——型深，m；

d——满载吃水，m。

9.6.2　其他情况下的甲板计算水柱高

其他情况下的甲板计算水柱高按表 1.2.4-20 选取。

表 1.2.4-20

甲板项目和位置	甲板计算水柱高h(m)
距首垂线 0.075L以前的露天强力甲板和首楼甲板	$1.50h_0$
距首垂线 0.075L～0.15 L露天强力甲板和首楼甲板	$1.25h_0$
距尾垂线 0.075L以后的露天强力甲板和尾楼甲板	$1.10h_0$
露天强力甲板装甲板货区域：	
距首垂线 0.075L以前	$0.49P+0.3(4.81P+0.3)$
距首垂线 0.075L～0.15L之间	$0.37P+0.3(3.63P+0.3)$
距首垂线 0.15L以后	$0.14P+0.3(1.39P+0.3)$
货物甲板	$0.14P(1.39P)$，但不小于甲板间平均高度
船　舱	2.00
机舱平台、修理间、机舱物料间	2.60
居住甲板	1.20
上层建筑甲板	1.00
居住甲板和上层建筑甲板的露天部分	增加（$h_0-1.20$）

注：①h_0见式（1.2.4-83）；

②P为设计载荷，kN/m²(tf/m²)。当装载率$r>0.72t/m^3$时，对应的甲板计算水柱高应乘以系数$K=r/0.72$，r见船舶强度计算书；

③货物甲板舱口盖上计算水柱高，取$h=H_c-1.00$，但不小于甲板间高。H_0为舱口盖板至上一层甲板的舱口围板上缘的距离（m）。

10　船舶阻力

10.1　阻力的组成

船舶阻力通常分为两大类：一是基本阻力，二是附加阻力。基本阻力是新出坞的船（不包括附属体）在平静水面行驶时之阻力。基本阻力分为摩擦阻力、粘压阻力、兴波阻力和破波阻力。附加阻力分为附体阻力、污底阻力、空气阻力和汹涛阻力。

10.2　基本阻力的成因及变化规律

10.2.1　摩擦阻力

如图 1.2.4-76 a)所示，一块平面薄板以速度v_0在水下拖动时，由于水的粘性，使湿表面上的水质点附着在板上随板运动，这些水质点又带动其外层水质点向前运动。由于水有可流动性，外层水质点速度小于内层速度，沿平板法向水质点流速逐渐减小。当水质点流速为0.5% v_0时，取该点到平板的法向距离为边界层厚度。由于平板边界层内水质点都因平板运动与其摩

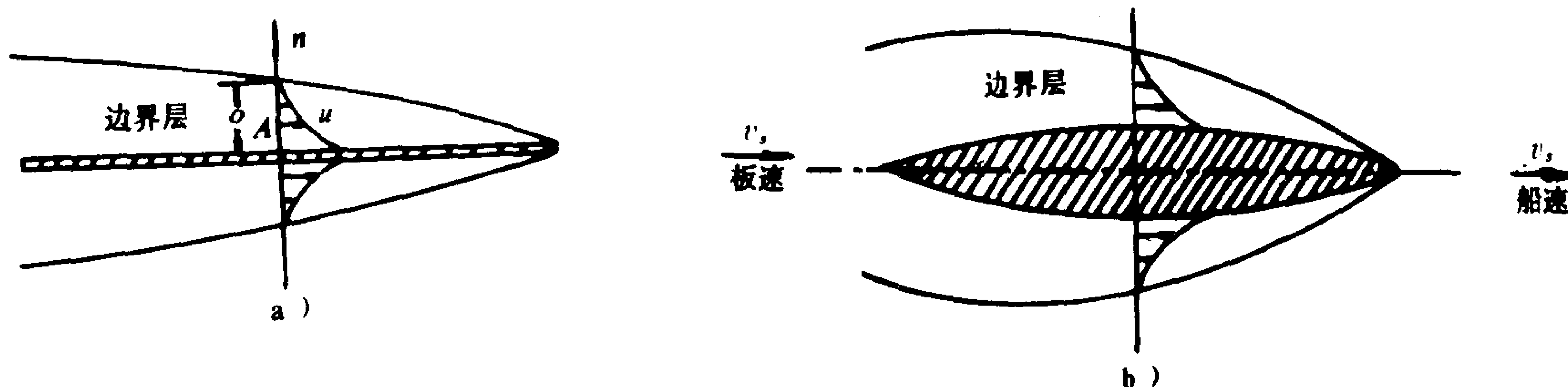


图 1.2.4-76 摩擦阻力

擦而得到能量，平板就受到阻力，称为摩擦阻力。船舶运动时，水和船体湿表面之间也要产生摩擦阻力，只是船体表面是曲面。考虑曲度影响后，在同样长度、速度和湿表面的条件下，船体摩擦阻力约比平板值大 1％～4％，如图 1.2.4-76 b）所示。

10.2.2 粘压阻力

船舶在水中等速直线运动时之受力，与船不动而水以等速流过船时作用在船上的力相同。现设水流以等速 V 流向船，如水是无粘性的理想流体，其粘压阻力为零。因为按伯努利方程，在同一水平面上流体流经物体时，其压力能与动能相互转化没有能量损失，物体前后不存在压力差。但实际水有粘性，水流自首向尾流动过程中，由于粘性不断消耗水流的动能，而产生一部分粘压阻力；更主要的是边界层中的粘性摩擦力使流体速度降低，以致在船体后部边界层分离，产生涡旋，一部分涡旋被冲向下流，带走了能量，其结果是船体后部压力降低，首尾产生压力差，形成粘压阻力。由于涡旋引起的粘压阻力占主要部分，故粘压阻力也常称为涡流阻力，如图 1.2.4-77 所示。

10.2.3 兴波阻力

船舶在平静水中航行，沿船体周围的流速发生变化，引起相应点的压强变化。因为水面各处都是一个大气压，故水压高处水面就升高，水压低处水面下降，形成随船前进的一系列船行波。由于兴起船行波要消耗能量，船就受到兴波阻力。

船行波有两大波系组成。首波系，产生于首柱稍后处，包括首散波和首横波，首横波以波峰开始；尾波系，产生于尾柱稍前处，包括尾散波和尾横波，尾横波以波谷开始。散波是一些向两舷分散的短波，散波的波峰线大致与船的中纵剖面成 18～20°交角。首散波与尾散波互不干扰。横波产生在相应的散波范围内，其波峰线横交于船的运动方向。首横波与尾横波在传递过程中会相遇而互相干扰，当首横波传至尾横波处，若波峰与波谷相遇，则合成后的波浪变得平坦，船的首尾压力差减小，兴波阻力减小，称为有利干扰。反之，首尾横波的波谷与波谷相遇，合成后船尾处水面低凹严重，船首尾压力差增加，兴波阻力增加，称为不利干扰，如图 1.2.4-78 所示。横波干扰有利与否，主要取决于船长和船速，合理选择此两参数，

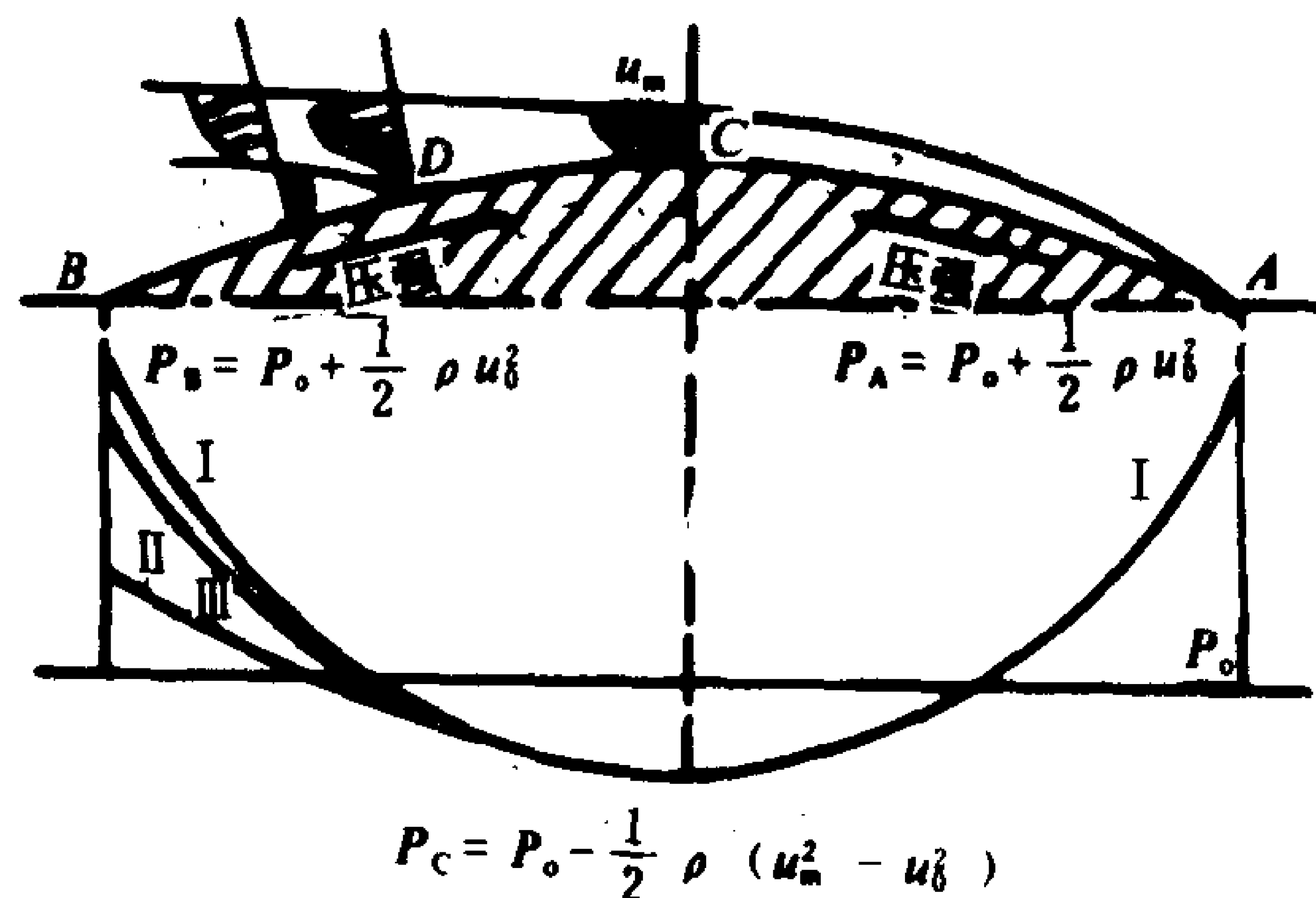


图 1.2.4-77 涡流阻力

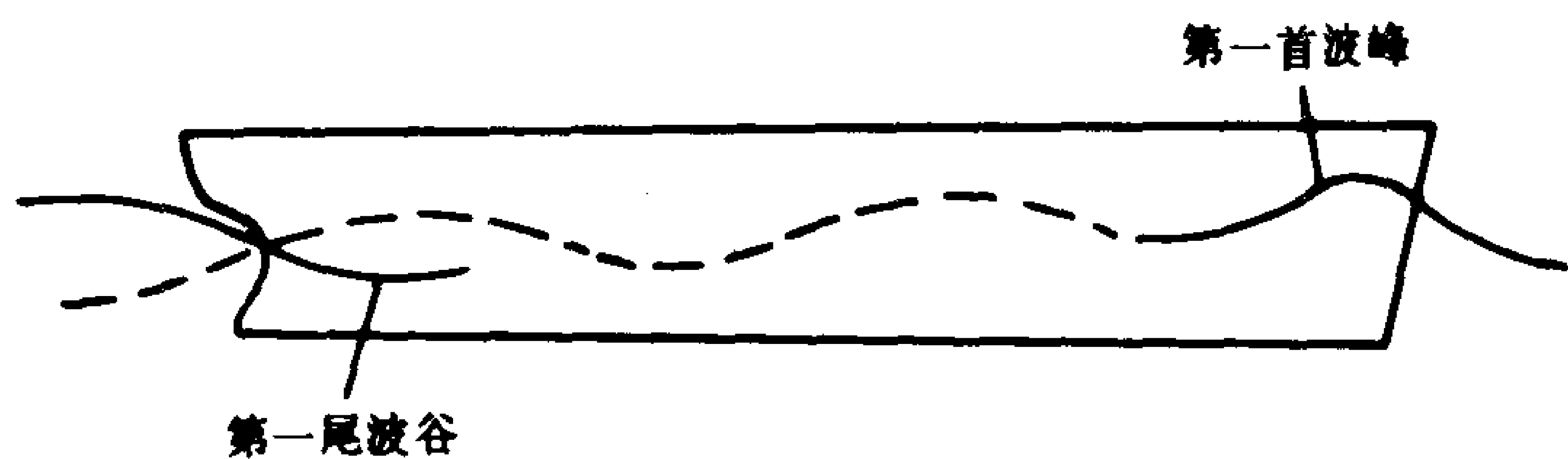


图 1.2.4-78 横波干扰

可望减小兴波阻力。有的船采用球鼻首，用它将首横波前移，也可达到降低兴波阻力的目的。

10.2.4 破波阻力

在肥大船型常见船首波破碎，使一部分波能耗散为尾流中的能量而产生破波阻力。它是由于波浪破碎而形成的粘性阻力。

采用球鼻首可减小船首波的陡直程度，因而可降低破波阻力。由于球鼻下沉较浅时作用较大，故船舶轻载时，球鼻对减少破波阻力的作用较满载时显著。

10.3 阻力的估算

10.3.1 摩擦阻力的估算

光滑船体湿表面的摩擦阻力可按下列公式估算：

$$R_f = 3.390 C_f \cdot S \cdot v_0^{1.825} = a_f \cdot S \tag{1.2.4-84}$$

式中：R_f——摩擦阻力，N；

C_f——摩擦阻力系数，$C_f = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68+L}$；

L——船长，m；

S——船体湿表面积，m^2；

v_0——船速，kn(浬(knot)表示海里/时等于 1852 m/h)；

a_f——每平方米湿表面积的摩擦阻力，Pa；根据L和v_0查表 1.2.4-21 可查得a_f值。

运输船的湿表面积可用下列近似公式估算：

$$S = Ld\frac{(2+B/2d)}{1.625-C_b}) \tag{1.2.4-85}$$

或

$$S = Ld[2+1.37(C_b-0.274)\frac{B}{d}] \tag{1.2.4-86}$$

式中：S——湿表面积，m^2；

L——水线长，m；

B——船宽，m；

d——吃水，m；

C_b——方形系数；

表 1.2.4-21　每平方米湿表面积摩擦阻力 (9.81 Pa)

船速(kn) \ 船长(m)	80	100	150	200	250	300	350
2	0.156	0.154	0.152	0.150	0.149	0.148	0.148
4	0.553	0.544	0.538	0.533	0.528	0.525	0.523
6	1.160	1.140	1.127	1.116	1.107	1.100	1.095

续上表

船速(kn) \ 船长(m)	80	100	150	200	250	300	350
8	1.958	1.925	1.908	1.886	1.870	1.858	1.850
10	2.944	2.895	2.861	2.835	2.811	2.793	2.781
12	4.107	4.037	3.990	3.954	3.921	3.896	3.880
14	5.441	5.350	5.287	5.289	5.195	5.162	5.140
16	6.943	6.826	6.746	6.685	6.629	6.587	6.559
18	8.610	8.465	8.366	8.291	8.221	8.169	8.134
20	10.433	10.257	10.138	10.046	9.962	9.898	9.856
22	12.416	12.206	12.054	11.955	11.855	11.779	11.729
24	14.553	14.307	14.140	14.013	13.895	13.806	13.748
26	16.842	16.558	16.365	16.217	16.081	15.978	15.910
28	19.279	18.954	18.732	18.563	18.407	18.290	18.212
30	21.866	21.497	21.246	21.055	20.877	20.745	20.656
35	28.972	28.484	28.151	27.897	27.663	27.486	27.369
40	36.967	36.343	35.919	35.595	35.295	35.071	34.921
45	45.830	45.057	44.532	44.130	43.758	43.480	43.295
50	55.546	54.609	53.972	53.485	53.035	52.698	52.473

注：表中值应乘 9.81，如船速 14 kn，船长 100 m，$a_f=5.35\times9.81$Pa

10.3.2 剩余阻力估算

把总阻力看成两部分之和，即总阻力等于摩擦阻力和剩余阻力。这样处理有利于试验结果的换算。剩余阻力常通过系列船模试验得出的系列图谱形式给出，对运输船来说最著名的是陶德图谱，它以每吨排水量的剩余阻力为磅表达（英制），即：

$$\frac{R_\tau}{D}=f\left(\frac{v_s}{\sqrt{L}},\ \frac{L}{B},\ \frac{B}{d},\ C_b\right)$$

各参数适应范围为：

$$\frac{v_s\ (\mathrm{kn})}{\sqrt{L(\mathrm{ft})}}=0.40\sim1.00;$$

$$\frac{L}{B}=6.5\sim8.5;$$

$$\frac{B}{d}=2.5,\ 3.0,\ 3.5;$$

$$C_b=\frac{V}{LBd}=0.6\sim0.8;$$

图谱数目较多，可参考"船舶设计实用手册第一分册"。

10.3.3 海军常数法

有了母型船，利用海军常数法可迅速预报本船的有效功率。当母型船和本船的傅汝德数（$F_r=\frac{v}{\sqrt{gL}}$）相等且几何相似时，其海军常数应该相等。常用有效功率的海军常数C_E：

$$C_E=\frac{V^{2/3}v_s^2}{P_E} \tag{1.2.4-87}$$

式中：V——排水体积，m³；

v_s——船速，kn；

P_E——有效功率，0.7355 kW。

使用此法时只要找到F_r数相近、船型相似的船的C_E值，就可把它取为本船的C_E值。C_E中三个参数排水量V、船速v_s和有效功率P_E中只要确定一个，其他两个参数中变一个，另一个就可确定。如排水量不变，有效功率变了，可迅速估算船速变化多少。

一般船舶的C_E值如下表：

表 1.2.4-22　　C_E　值

船　　型	船　　长	排水体积	船　速 v_s	有效功率 P_E	海军常数C_E
	m	m³	kn	0.7355 kW	
高速商船	280.0	67700	23.2	61800	302
	202.0	22900	23.5	37800	298
	199.5	21385	22.0	27000	327
大客船	194.0	22100	18.0	17200	287
	193.0	23200	15.0	9800	315
	170.0	17250	16.5	10600	305
	136.5	13170	13.5	4800	308
	121.4	10340	11.5	2500	322
小客船	69.5	2200	10.0	1050	190
大货船	170.7	24800	13.5	5460	418
	152.4	21115	12.0	4000	359
	131.2	12400	11.0	2500	316
	105.2	7980	11.0	1700	357
小货船	88.1	4580	10.5	1225	305
	79.8	3400	9.0	700	288
	62.1	1760	9.0	440	307
	47.3	940	8.0	350	181
	37.8	320	9.0	260	173
拖船	40.0	390	11.0	350	262
	15.2	48	9.1	150	91

10.4 附加阻力

10.4.1 附体阻力

实船必须安装一定的附体，如舵、舭龙骨、轴包等，由于水对附体作用而产生的那一部分阻力，称为附体阻力，附力阻力占基本阻力的百分比见表 1.2.4-23。计算时通常在基本阻力上加上相应的百分数。为减少这种阻力，要求各种附体尽可能呈流线型；安装位置应尽量顺该处之水流线方向。

表 1.2.4-23　　附体阻力

附　体	占基本阻力百分数		
	单桨货船或客货船	双桨货船或客货船	高速客船
舵	4.5%	2.0%	1.5%
舭龙骨	3.0%	2.5%	2.5%
轴包架	——	2.5%	4.0%

10.4.2 空气阻力

空气阻力是指空气作用于水面以上船体及上层建筑部分的阻力。运输船无风航行时，空气阻力约为基本阻力的 1.5%～3.0%；顶风 4 ～ 5 级时，为 10%～15%；顶风 8 ～ 9 级时，为 30%～40%。空气阻力的大小与空气密度、上层建筑大小及形状、风向及相对风速等有关。

10.4.3 污底阻力

船舶由于海生物（虫壳和海草）附着于船底以及生锈造成污底。污底使船底湿表面越来越粗糙，其所增加的阻力，称为污底阻力。

已知污底程度，可按下式估算污底的摩擦阻力：

$$R_F = a_F \cdot S \quad \text{N} \tag{1.2.4-88}$$

式中：a_F——每平方米湿表面积污底的摩擦阻力，Pa，可根据污底程度和船速查表1.2.4-24；

S——船体湿表面积，m^2；

为保持航速，船舶应定期进坞清理污底。通常在船底先涂两度防锈漆，再涂一至两度防污漆。防污漆中含有致毒成分，可使虫不能寄生，但其防污性能却有一定有效期，失效后，仍可发生污底。

表 1.2.4-24　　每平方米湿表面积的污底阻力a_F（9.81×Pa）

船速(kn) \ 污底重(kg/m²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0.140	0.148	0.158	0.172	0.188	0.210	0.241	0.276	0.307
4	0.588	0.625	0.662	0.717	0.780	0.883	1.01	1.18	1.29
6	1.38	1.46	1.55	1.68	1.85	2.07	2.36	2.71	3.01
8	2.51	2.67	2.82	3.06	3.45	3.77	4.33	4.95	5.50
10	4.03	4.38	4.58	4.91	5.42	6.05	6.98	7.93	8.32
12	5.92	6.29	6.66	7.22	7.96	8.87	10.2	11.7	13.0
14	8.20	8.70	9.22	9.97	11.0	12.3	14.1	16.1	17.9
16	10.9	11.6	12.2	13.3	14.6	16.3	18.7	21.4	23.8
18	13.4	14.2	15.1	16.3	18.0	20.1	23.0	26.3	29.2
20	17.3	18.4	19.4	21.1	23.2	25.9	29.7	34.0	37.8
22	21.1	22.4	23.7	25.7	28.4	31.7	36.3	41.6	42.2
24	25.4	27.0	28.6	31.0	34.2	38.2	43.7	50.3	55.7
26	30.1	31.9	33.8	36.7	40.4	45.2	51.7	58.3	64.9
28	35.2	37.4	39.6	42.8	47.2	52.8	60.5	69.3	77.0
30	41.0	43.5	46.2	49.8	55.0	61.5	70.4	80.7	89.6
35	56.4	58.8	63.4	68.7	75.8	84.5	96.8	111	123

注：表中数值均应乘9.81，如船速14 kn，污底重5 kg/m²；a_F=11×9.81Pa。

10.4.4 汹涛阻力

船舶在大风浪中航行时，由于风浪和船身的剧烈运动，使船舶的阻力大大增加，增加的这部分阻力称为汹涛阻力。若主机发出的功率不变，船速将大大下降，这种船速下降的现象称为失速。船在风浪中的失速Δv可用下式表示：

$$\Delta v = v_R - v \tag{1.2.4-89}$$

式中：v_R——船在风浪中的航速；

v——船在静水中的航速。

船的失速与以下因素有关：

（1）波长：试验证明顶浪航行时$\lambda/L=1.00\sim1.25$时，失速最大，且颠簸也最剧烈（λ—波长，L—船长）；

（2）波高：波高越大，失速越大；

（3）风浪方向：顶风、顶浪时（左右各偏 30°范围内）

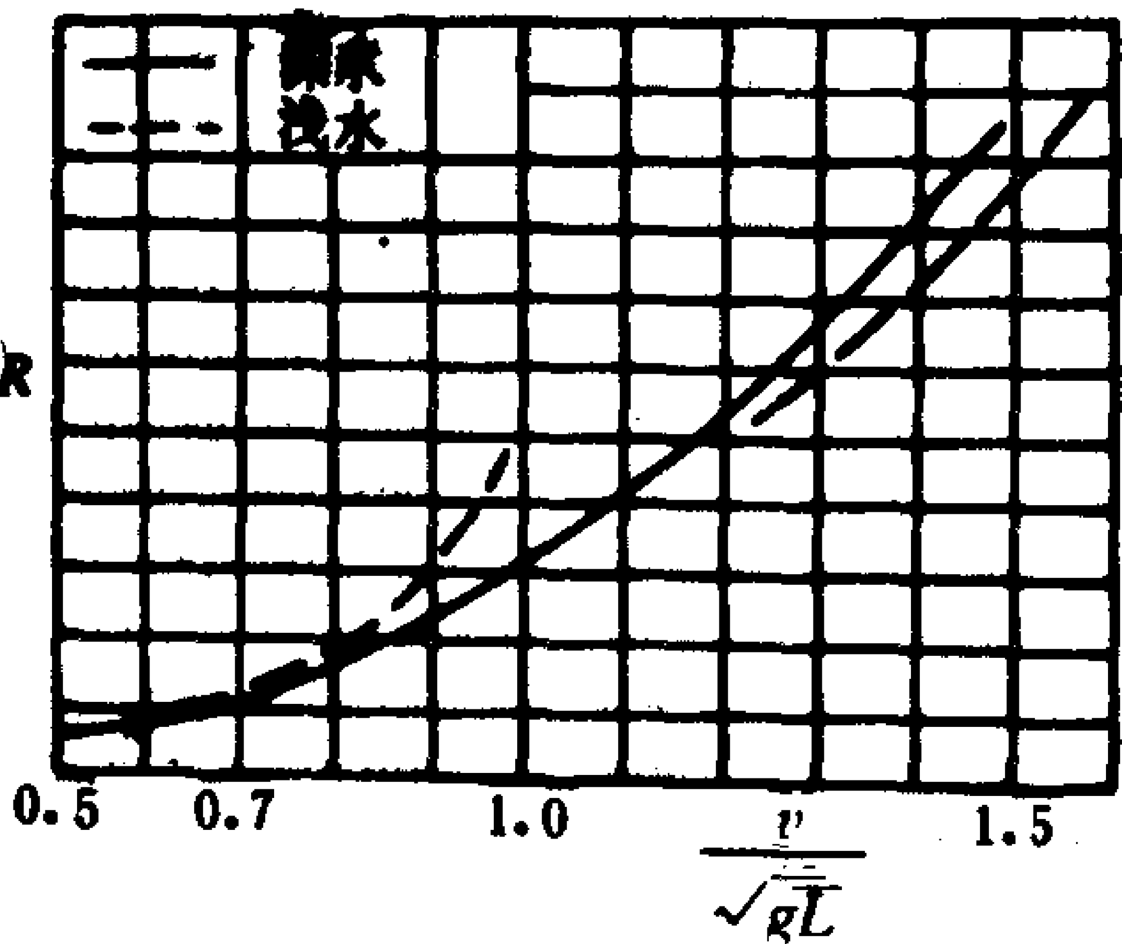


图 1.2.4-79　浅水阻力曲线

失速最大，顺风、顺浪时有时还可增加船速；

（4）方形系统较大，风浪中失速也越大；

（5）静水船速愈大的船，在大风浪中失速反较严重。

在大风浪中维持船速，通常要求主机具有一定的功率储备。运输船舶主机应有15～30%的储备，客船高些，货船较低。

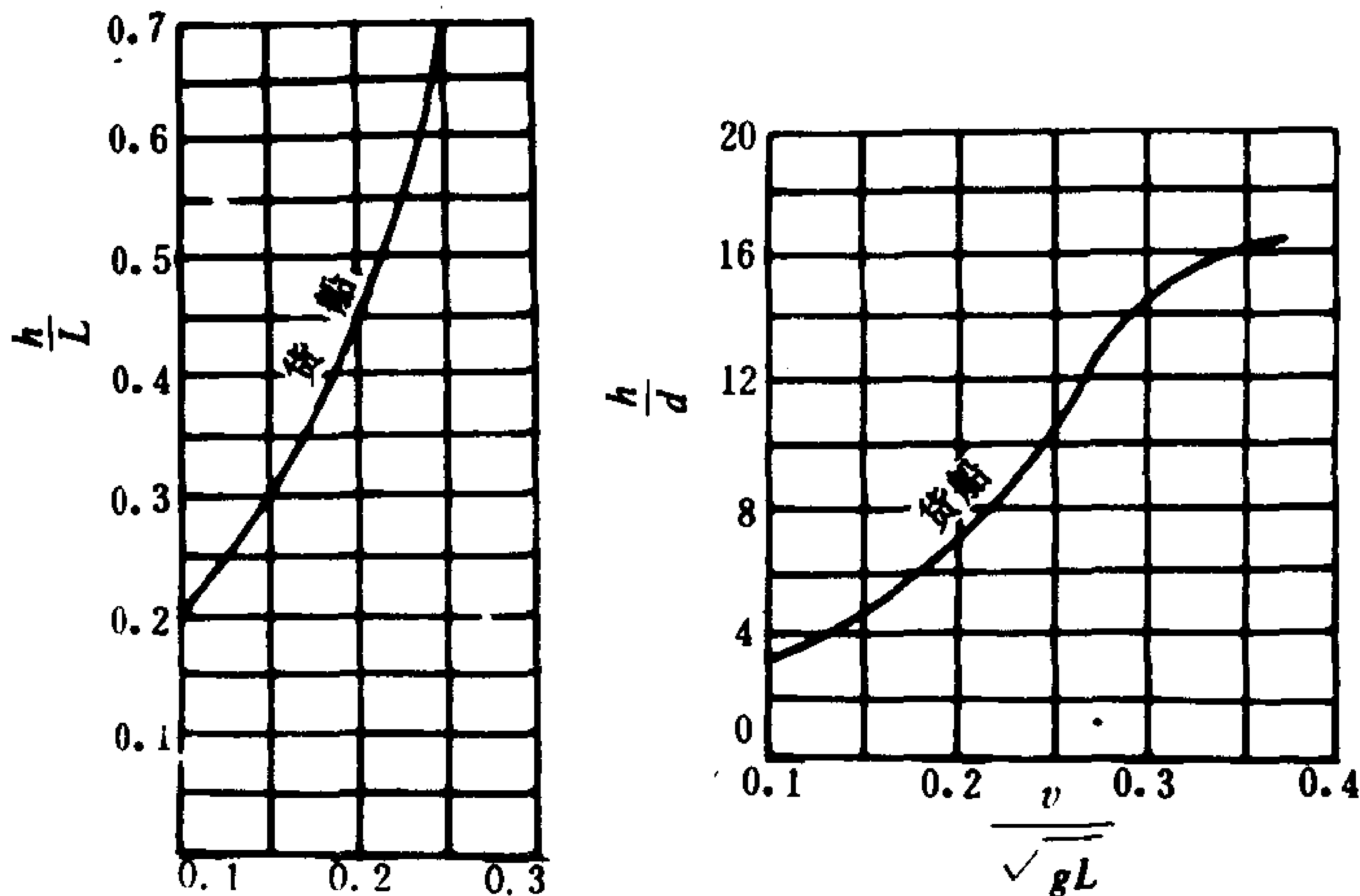


图 1.2.4-80　不影响阻力的水深

10.5　浅水对阻力和航行状态的影响

10.5.1　浅水对阻力的影响

浅水对摩擦阻力的影响主要与h/d（水深吃水比）和傅汝德数$F_r=v/\sqrt{gL}$有关。在同一F_r下h/d越小，其摩擦阻力增加越显著。当水深越过一定数值时（例如$F_r=0.15$，$h/d>4.146$），则水深对摩擦阻力并无影响。同一水深条件下，浅水对摩擦阻力的影响随船速增大而增大。

浅水对兴波阻力的影响主要用水深傅汝德数$F_{rh}=v/\sqrt{gL}$来表征。其变化曲线如图 1.2.4-79 所示。由图可见：$F_{rh}<0.3\sim0.5$时，阻力无大影响；$F_{rh}>0.5$后阻力加大；当$F_{rh}>0.9$时，阻力显著增大；$F_{rh}=1.0$时，阻力增加值最大；$F_{rh}>1.1$以后，兴波阻力反而降低；但一般运输船很少能达到这样的船速。

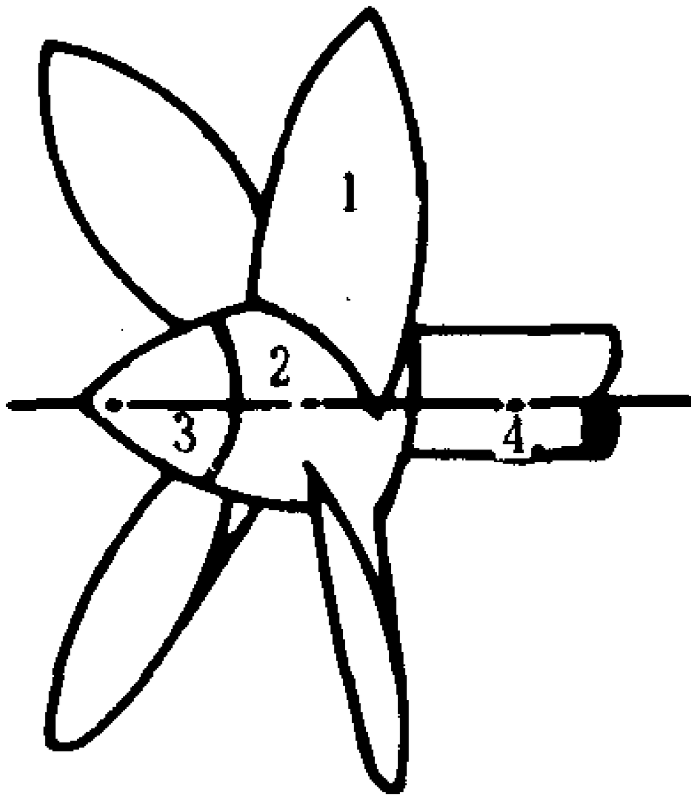


图 1.2.4-81　螺旋桨结构

图 1.2.4-80 给出了不影响阻力的水深条件。当F_r较小时采用前者；F_r较大时采用后者。此图适用于一般货船。

10.5.2　浅水对航行状态的影响

船在浅水中航行时，因船底流速加快，压强下降，故其吃水比在深水中航行增大，同时还会引起纵倾。通常认为：$v<\sqrt{gh}$时，船体将因浅水而下沉，$\frac{\Delta d}{d}$的最大值可达0.33。当$v>\sqrt{gh}$时，船反而上浮，船在$v<0.6\sqrt{gh}$时首倾，$V>0.6\sqrt{gh}$时尾倾；$V=\sqrt{gh}$时尾倾接近最大值。为此对某些浅水区必须考虑船底碰撞水底的问题。

11　船舶推进

11.1　螺旋桨的形状和结构

海船推进器均采用螺旋桨，如图 1.2.4-81 所示，螺

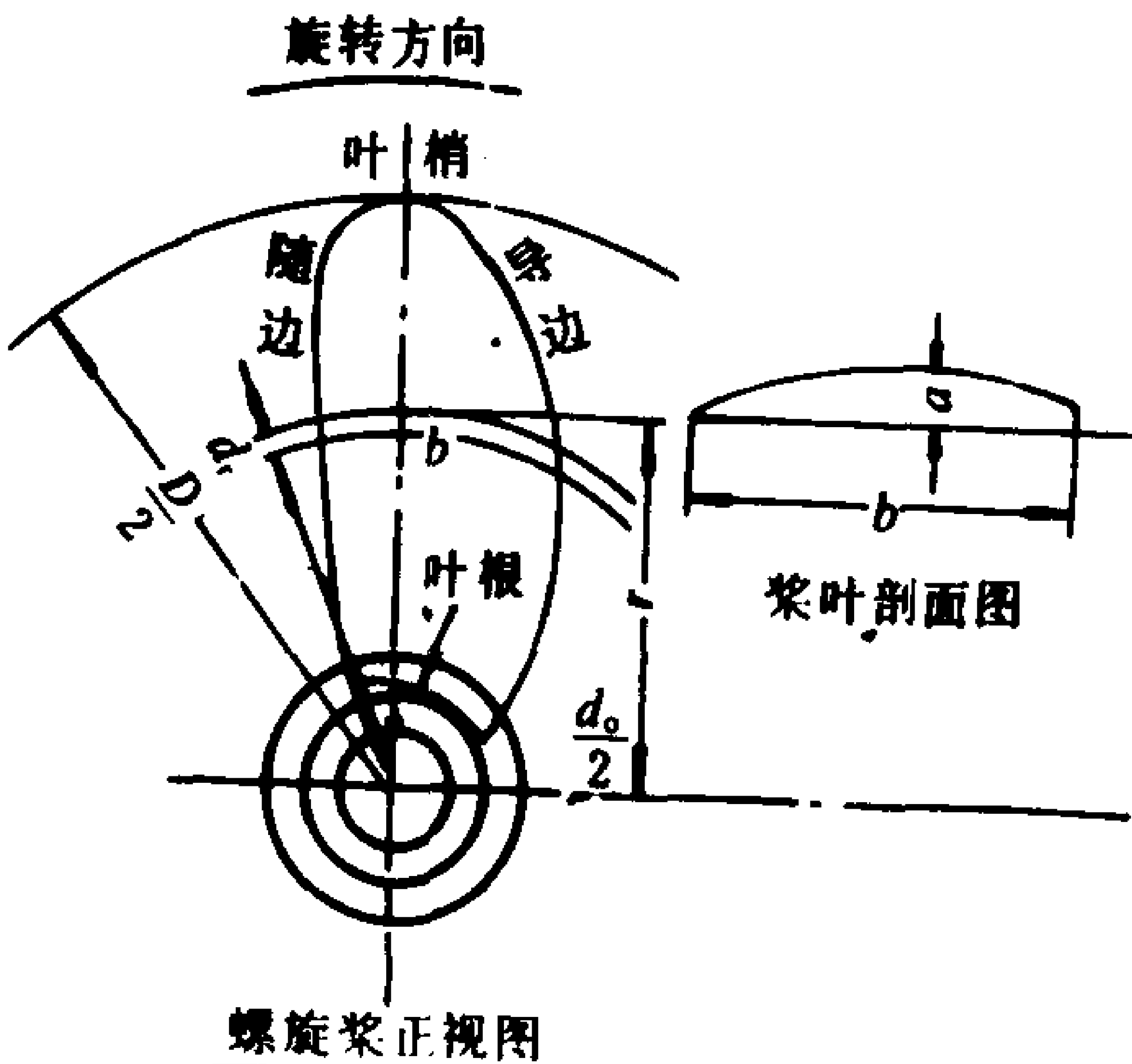


图 1.2.4-82　螺旋桨几何要素

旋桨由桨叶1和桨毂2组成，为减小阻力，桨轴（尾轴）4后装整流帽3。

桨叶是一种扭曲的机翼，其朝舵的一面是螺旋面的一部分。桨叶旋转一周，其上一点前进的距离称为螺距，以P表示。螺旋桨的几何要素主要有：

（1）直径D；

（2）螺距比P/D；螺距角$\text{tg}\phi = P/2\pi D$；

（3）叶数Z；

（4）盘面比；$\theta = ZS/\frac{\pi}{4}D^2$，其中$S$为一个桨叶的面积；

（5）叶片的外形和剖面形状，如图1.2.4-82所示。

桨叶的叶尖称为叶梢，桨叶接连于桨毂的部分称为叶根。桨叶正车旋转时，前面的叶边称为导边，后面的叶边称为随边。

11.2 螺旋桨产生推力和消耗转矩的原理

螺旋桨工作是靠叶片打水完成的，整个叶片的作用可看成无数“叶片元”的作用的总和。所谓“叶片元”是指以r和$r+dr$为半径的圆弧所截取的一小块叶片（如图1.2.4-82）。叶片元的作用可以看成是一个很短的机翼（翼弦为b，翼展为dr）如图1.2.4-83所示，在此首先介绍机翼的开力和阻力的知识。

图1.2.4-82是一块等剖面的机翼，l为机翼的翼展（相当于桨叶的叶长），b为机翼的翼弦（相当于桨叶的叶宽），$\lambda = l/b$称为展弦比。将机翼置于均匀来流中，来流速度为v，v与翼剖面弦线间的夹角为冲角α，用仪器可测得垂直于来流v方向的升力为L，平行于v的阻力为D。升力和阻力的合力称为流体动力F，升力和阻力可表示为：

$$\left.\begin{aligned} L &= C_L \frac{1}{2}\rho v^2 s \\ D &= C_D \frac{1}{2}\rho v^2 s \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.4\text{-}90)$$

式中：ρ——流体密度；

v——机翼与流体的相对速度；

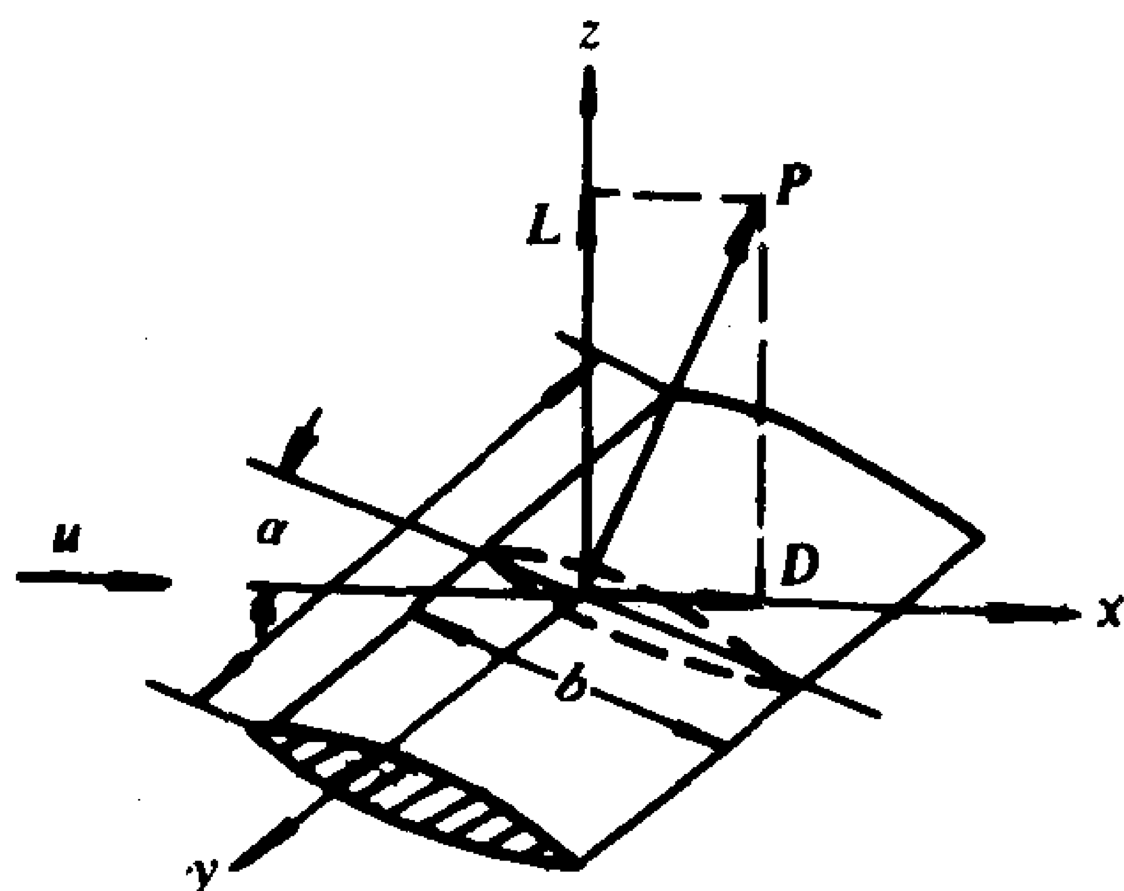


图1.2.4-83 机翼的升力和阻力

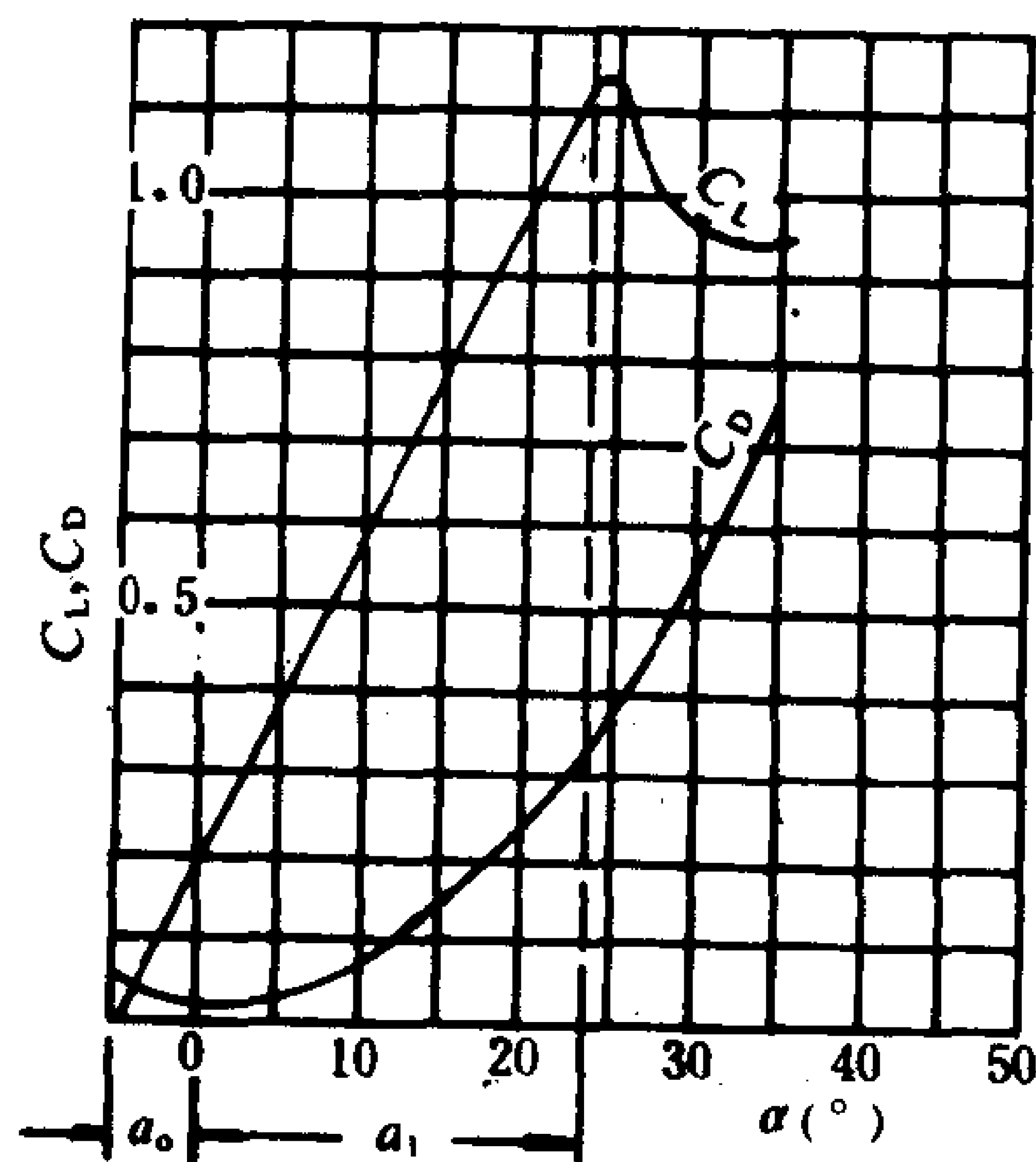


图1.2.4-84 升力和阻力系数

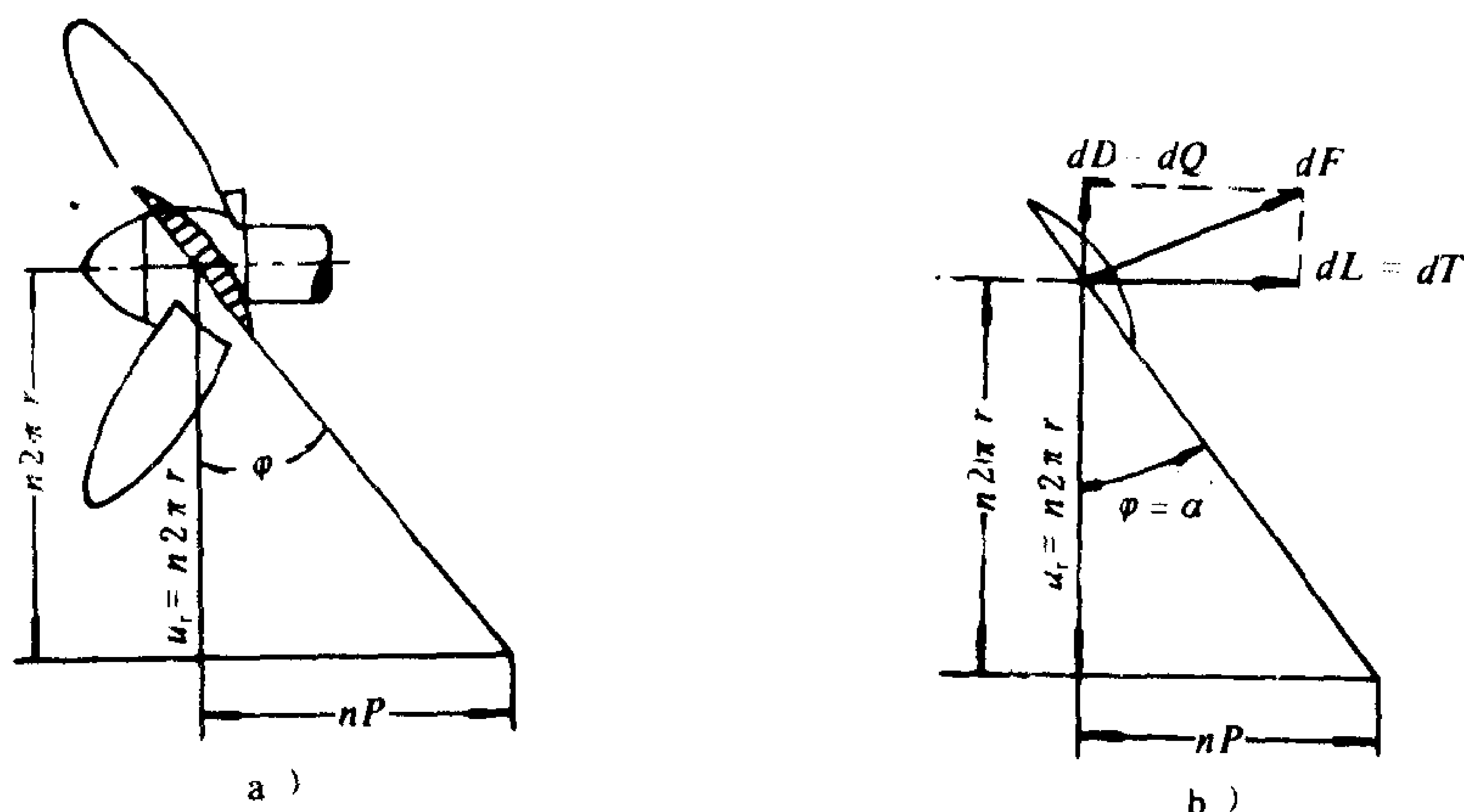


图 1.2.4-85 系泊时螺旋桨的推力

s——机翼面积，$s=l\cdot b$;

C_L——升力系数;

C_D——阻力系数。

图 1.2.4-84 为C_L、C_D随冲角的变化规律。

由于螺旋桨“叶片元”以机翼形式在水中转动又随船一起前进，它与水有相对运动，形成冲角，产生升力和阻力，升力就形成对船的推力，阻力对桨轴形成阻力矩，于是就要消耗主机的转矩才能使桨转动。

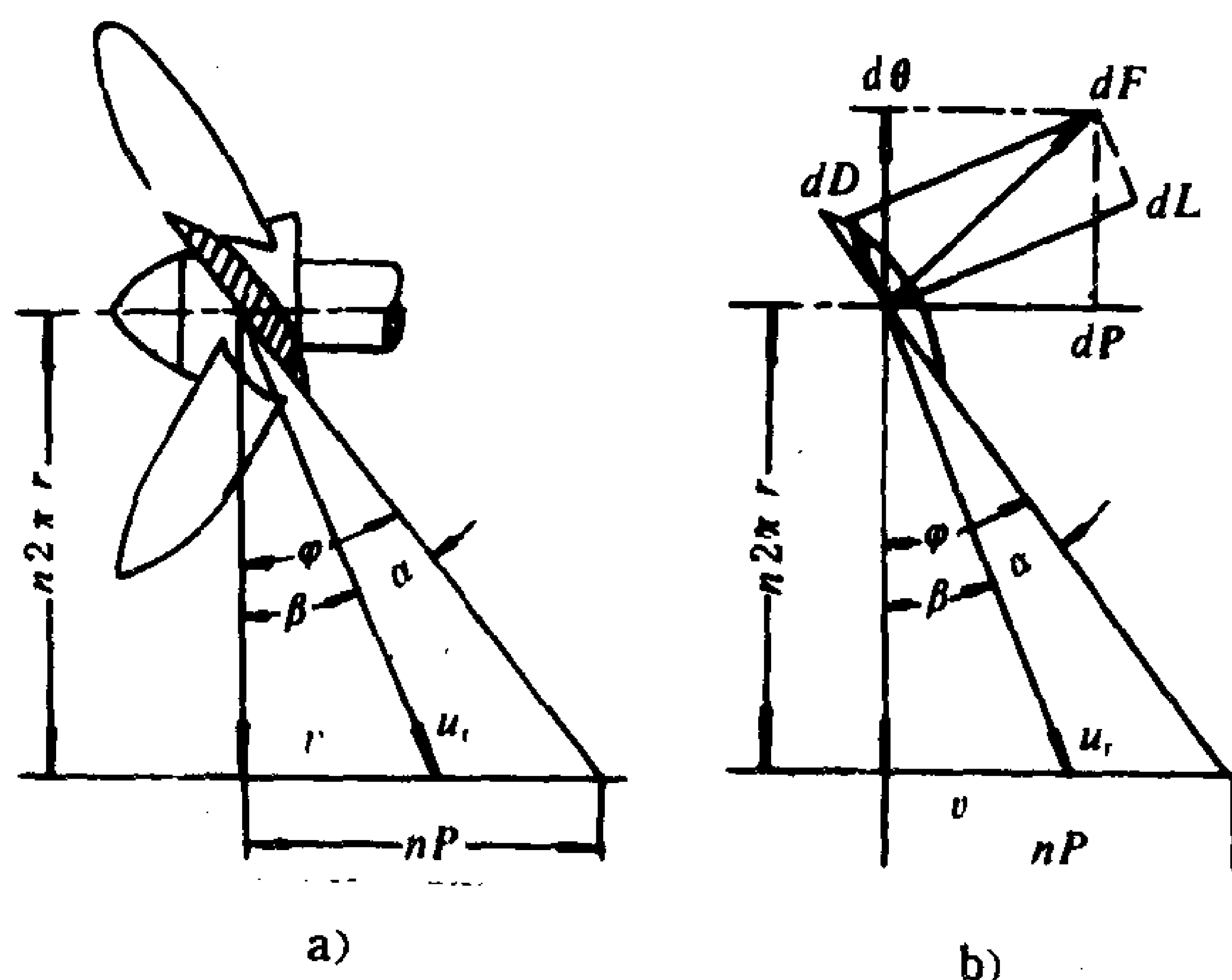


图 1.2.4-86 前进时螺旋桨的推力

11.3 螺旋桨的推力特性

11.3.1 系泊时螺旋桨的推力

船在静水中系泊时，船速v_s为零，若不计船体对螺旋桨的影响，则此时螺旋桨的前进速度v_A也为零。当螺旋桨以转速n转动时，在半径r处叶片剖面与水的相对速度v_τ仅为切向速度如图 1.2.4-85 所示，即

$$v_\tau=2\pi rn$$

此时叶剖面的冲角α即等于螺距角ϕ。显然，系泊时螺旋桨转动有最大的冲角。

11.3.2 前进与后退时螺旋桨的推力

系泊和航行时螺旋桨运动不同，系泊时叶剖面只有旋转运动；航行时叶剖面除旋转外，尚有随船前进的螺旋桨进速v_A（图 1.2.4-86），来流速度v_τ由“$2\pi rn$”变为“$2\pi rn$与v_A的合

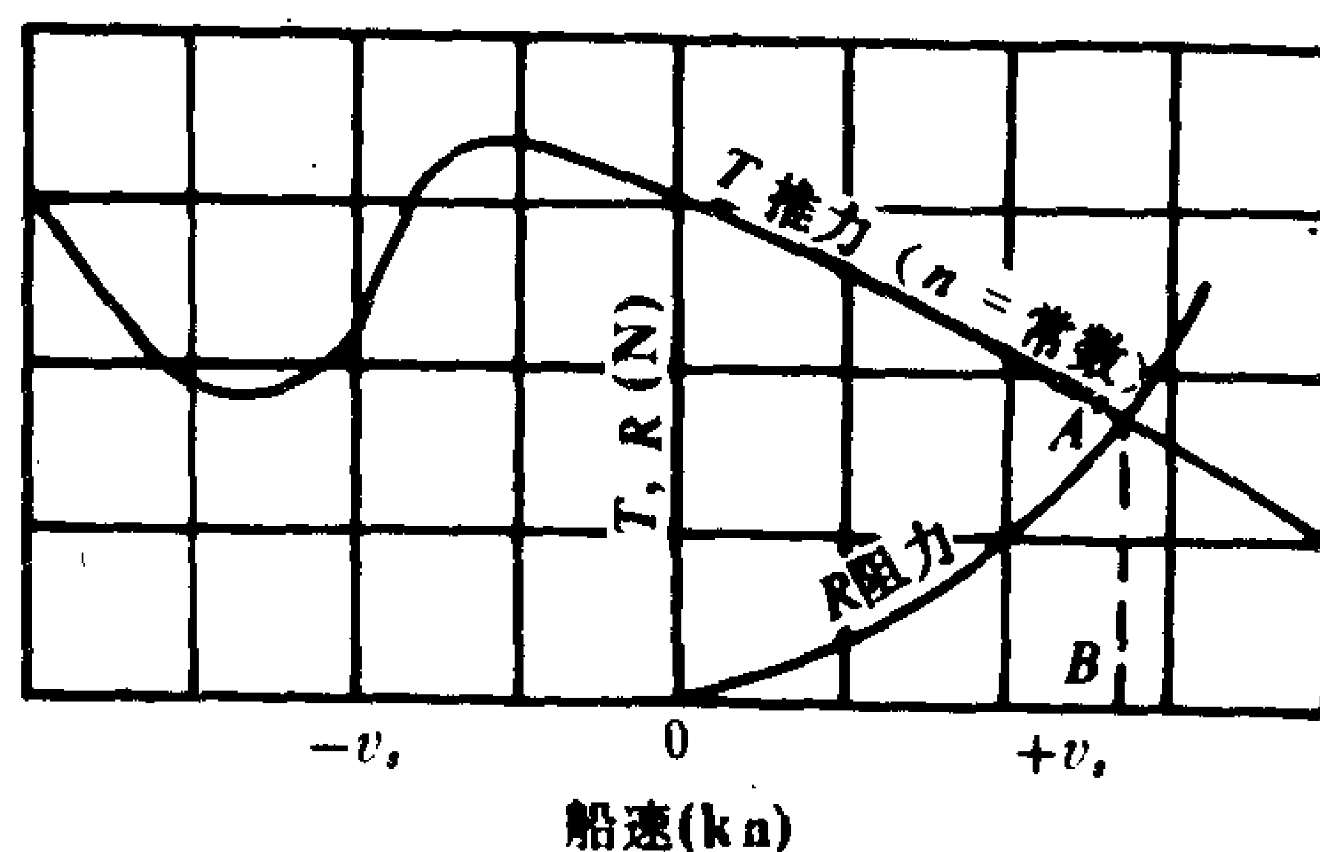


图 1.2.4-87 一定转速时之推力特性

速”，冲角α由φ变为“$\varphi-\beta$”。叶剖面螺距角与冲角之差称为进程角，即：

$$\beta=\varphi-\alpha$$

而 $$\mathrm{tg}\beta=\mathrm{tg}(\varphi-\alpha)=v_A/2\pi rn$$

对整个螺旋桨则用进速系数J来表征其进程角：

$$J=v_A/nD \qquad (1.2.4\text{-}91)$$

在螺旋桨转速一定的条件下，随着船速的提高，冲角变小，C_L和C_D减小，加上进程角增大的影响，使螺旋桨推力逐渐下降，即航行时推力小于系泊时的推力(如图1.2.4-86所示)。图中右半部是前进船速提高时推力变化情况，左半部是后退船速提高时推力变化情况。对照图1.2.4-86，后退航速$-v_S$应指向后方，此时冲角$\alpha=\varphi+\beta$，即冲角大于螺距角，$-v_S$增大时，推力开始增大，当α超过失速角α_0后，升力急剧下降，使推力出现突降。当α继续增大时，推力又有回升。由此可见，在一定转速下，推力曲线近似于横写的“S”形，同时，转矩曲线也有类似规律。

已知船体阻力是随船速提高而增大的，如图1.2.4-87所示，上推力曲线与阻力曲线的交点A，表示推力等于阻力，交点的垂足B为螺旋桨n转时等速前进船速。每台主机均有其额定转速及额定转矩，若螺旋桨几何要素匹配得当，可使船舶获得较高船速，一般船舶在海上全速航行时，为留有储备，其主机转速取为额定转速的96%～97%。当进出港或系泊操纵时，由于船速较低，为不使主机超负荷，其转速要比海上航行为低。

船舶实际操纵时可能采用不同转速，既有前进也有倒车，螺旋桨工作状况变化很大，为方便操纵，可作出各种转速下的推力特性线组成图谱，供操船人员使用。

11.4 船体和螺旋桨的相互影响

11.4.1 伴流

船在水中以航速v_0行驶时，其附近水受船体运动影响，产生一种追随运动的水流，该水流称为伴流。伴流主要由两部分组成，即摩擦伴流和势伴流。

摩擦伴流是船体运动时，由于水的粘性引起的一种追随水流，势伴流是船体前进运动时，首部将水向两舷挤开，尾部由水填空而引起的在尾部的一种追随水流。

由于伴流存在，使螺旋桨处的相对流速降低。取螺旋桨处平均伴流速度为w_x，则螺旋桨处平均进速为：

$$v_A=v_0-w_x=v_0(1-\frac{w_x}{v_0})=v_0(1-\psi) \qquad (1.2.4\text{-}92)$$

式中：ψ——伴流系数，$\psi=\frac{w_x}{v_0}$。

由海船的实船和船模试验求得ψ的经验公式为：

$$\psi=0.50C_b-0.05 \quad (单桨船)$$

$$\psi=0.55C_b-0.20 \quad (双桨船)$$

式中：C_b——方形系数。

11.4.2 推力减额

螺旋桨旋转时，不断把水流打向后方，水流经螺旋桨后加快了速度，按伯努利方程，船尾压强应降低，从而使船体阻力增加。从螺旋桨产生的有效推力来看，这部分增加的阻力可以认为是螺旋桨推力的减少。设螺旋桨的有效推力为T_0，推力减额ΔT，则有：

$$T_0 = T - \Delta T = T(1 - \frac{\Delta T}{T}) = T(1-t) \quad (1.2.4\text{-}93)$$

式中：T——螺旋桨发出的推力；

t——推力减额系数。

t值可由下列经验公式估算：

单桨船：$t = C_t\phi$　　　（ϕ—伴流系数）；

$Ct = 0.5 \sim 0.7$（桨后装流线型舵）；

$C_t = 0.7 \sim 0.9$（桨后装方形尾柱和双板舵）；

$C_t = 0.9 \sim 1.05$（桨后装平板舵）

双桨船：$t = 0.25\phi + 0.14$　　（装轴包架）；

$t = 0.75\phi + 0.06$　　（装人字架）

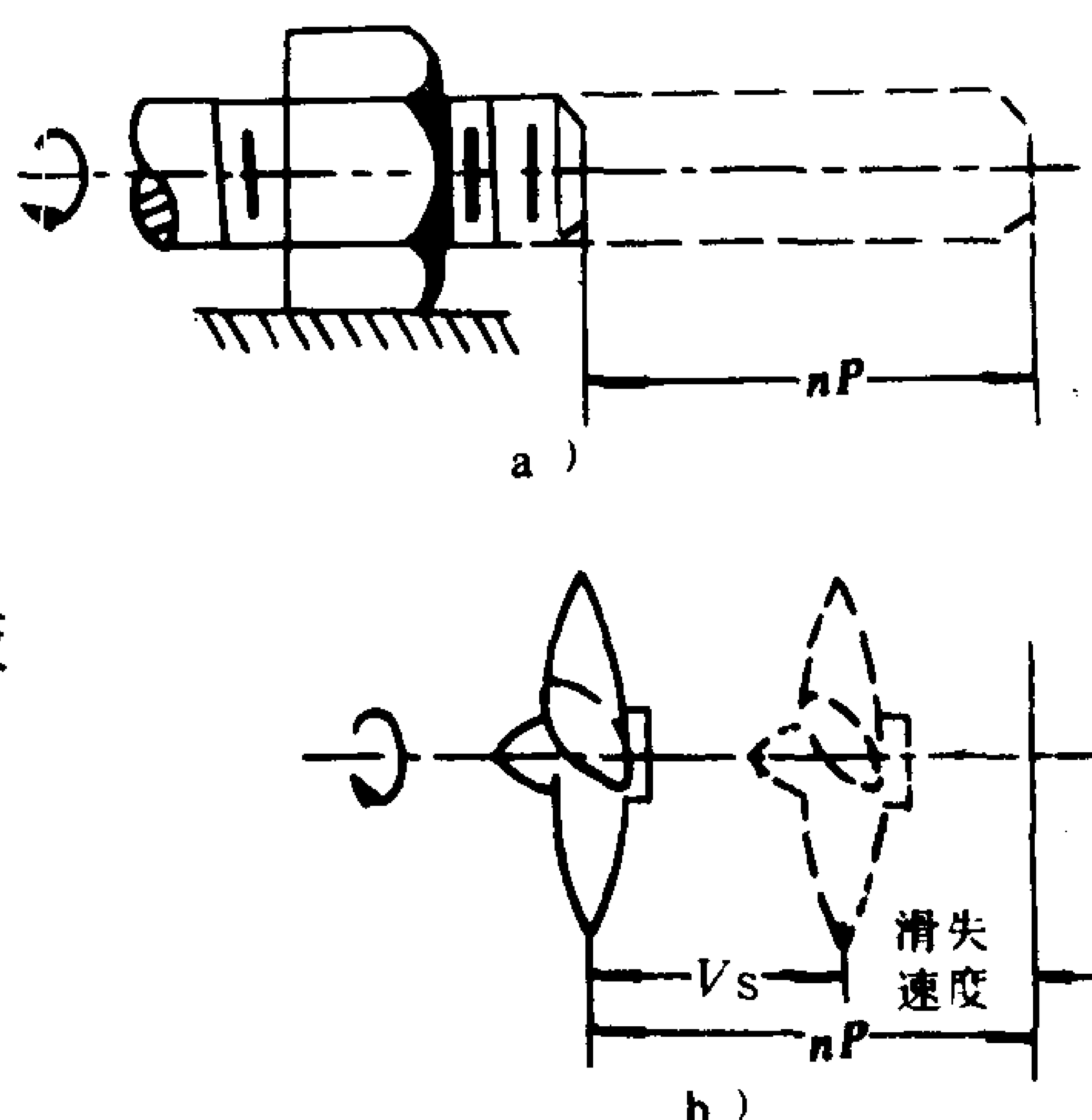


图 1.2.4-88　滑脱速度

11.5　利用螺旋桨转速估算船速

11.5.1　滑脱速度

螺旋桨如在固体内旋转一周，其前进距离为螺距p，如转速为n，则其前进速度为np，如图 1.2.4-88 所示，因水有流动性，螺旋桨转速为n，而螺旋桨对地的前进速度为v_s，它与np有差值，这个差值称为滑脱速度，即：

$$\text{滑脱速度} = np - v_s$$

上式说明，螺旋桨在水中旋转和在固体中旋转的差别在于其滑脱速度。

11.5.2　滑脱比

滑脱速度与np之比称为滑脱比，即：

$$S = \frac{nP - v_s}{np} \quad (1.2.4\text{-}94)$$

对照图 1.2.4-87 可以想到，螺旋桨是否具有推船前进的推力，取决于是否具有滑脱速度。实际上滑脱速度愈大，意味着推力愈大。从图上看出滑脱速度大，即水流的冲角也大。

11.5.3　利用转速估算航速

将式（1.2.4-94）变换为：

$$v_s = np(1-s) \quad (1.2.4\text{-}95)$$

式中：v_s——船速；

n——螺旋桨转速；

p——螺旋桨螺距；

s——滑脱比。

若在实船上，于一定螺旋桨转速n时测出其船速v_s（应消除潮流影响），则可用式（1.2.4-95）求出其滑脱比s。这样在已知滑脱比s的情况下，根据螺旋桨转速n和螺距p可求出船速v_s。上述方法是航迹推算时估算船速的一种简便方法。具体实施时，可先找出无风浪天气几种吃水情况的s值（并注意出坞日期），然后根据风浪和污底情况加以修正。

11.6 螺旋桨水动力特性图谱

11.6.1 螺旋桨水动力特性曲线

在确定船舶螺旋桨推力数值时，通常用模型螺旋桨测出的结果换算为实桨的推力。

根据相似理论，模型与实桨只要几何相似，且两者的无量纲系数J、R_n、F_r分别相等，则两者的推力系数K_T相等。$J=v_A/nD$为进速系数。v_A—螺旋桨进速(m/s)；n—转速((r/s)；D—螺旋桨直径(m)。$R_n=\frac{0.756}{\nu}\sqrt{v_A^2+(0.75\pi nD)^2}$；$\nu$—水的运动粘性系数(m²/s)；当$R_n$

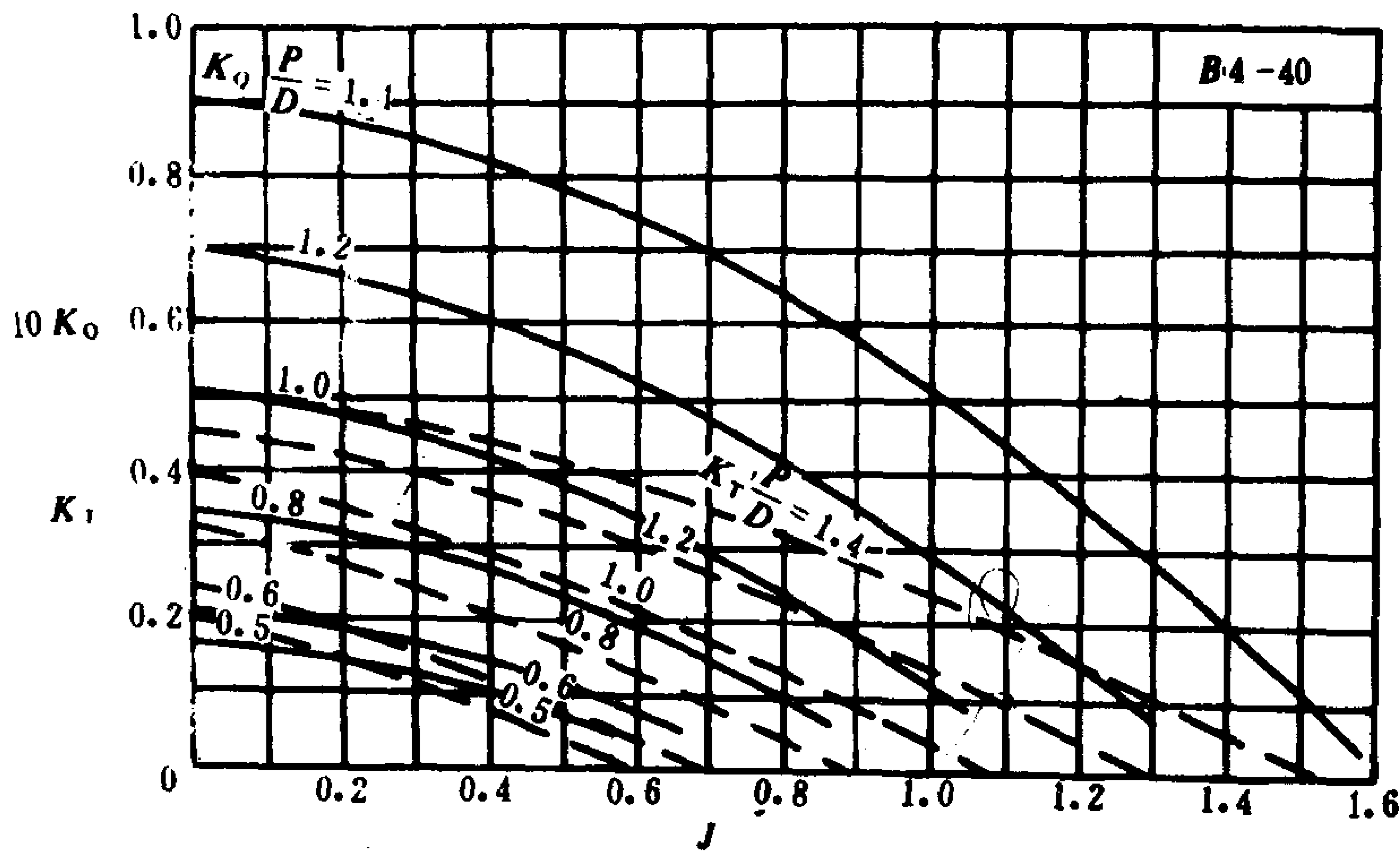


图 1.2.4-89 B 4 -40 水动力特性曲线

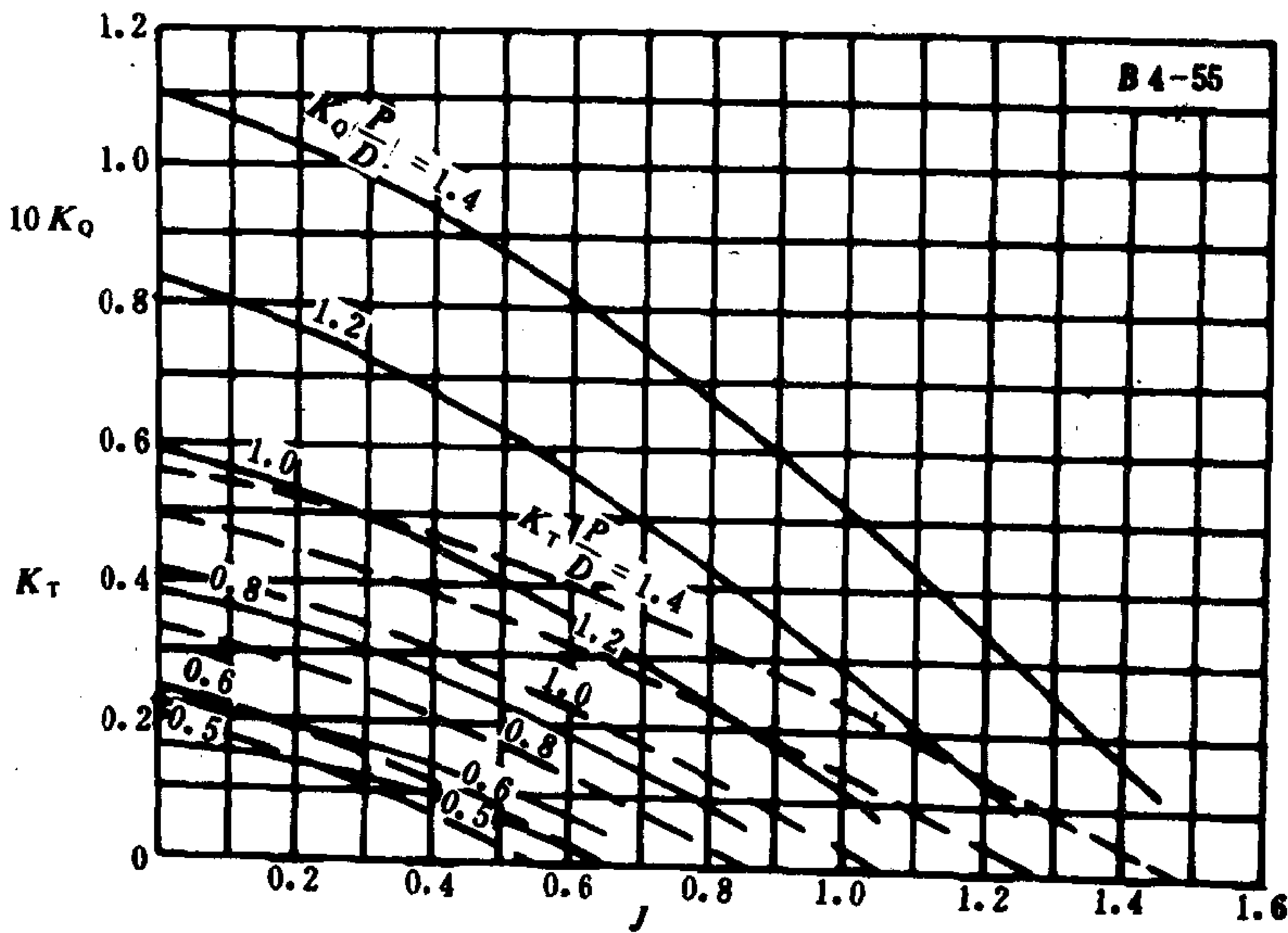


图 1.2.4-90 B 4 -55 水动力特性曲线

$>3\times10^5$时，K_T将不随R_n变化，即只要模型的R_n大于$3>10^5$即可，不必要求模型与实桨的R_n相等。$F_r=v_A/\sqrt{gD}$；g—重力加速度（m/s²）；当螺旋桨轴中心线距水面的沉深$h>0.625D$时，兴波对推力的影响可以忽略不计。

由上分析可见，当$R_n>3\times10^5$，$h>0.625D$（实际试验时取$h=D$）时，只要模型与实桨几何相似并进速系数J相等，模型与实船的推力系数就相等。同样，两者的转矩系数也相等，这样可用下式求出推力T和转矩M_Q：

$$\left.\begin{aligned}T&=K_T\rho n^2D^4\\M_Q&=K_Q\rho n^2D^5\end{aligned}\right\}\tag{1.2.4-96}$$

式中：ρ——水密度，kg/m³。

对于给定几何形状的螺旋桨，例如：叶数$Z=4$；盘面比$\theta=0.40$；直径$D=0.24$m；螺距比$p/D=1.4$。用拖车将敞水螺旋桨以进速v_A向前匀速拖动，同时以转速n匀速转动，在桨轴上测出其推力和转矩。由下式求出推力系数和转矩系数：

$$\left.\begin{aligned}K_T&=\frac{T}{\rho n^2D^4}=f_1\left(\frac{v_A}{nD}\right)\\K_Q&=\frac{M_Q}{\rho n^2D^5}=f_2\left(\frac{v_A}{nD}\right)\end{aligned}\right\}\tag{1.2.4-97}$$

若给定螺旋桨的转速n，以不同进速v_A匀速拖动螺旋桨，则可取得各不同进速系数$J=\frac{v_A}{nD}$条件下，各对应的K_T和K_Q值。从而可在图 1.2.4-89 上画出$Z=4$、$\theta=0.40$、$p/D=1.4$螺旋桨的$K_T=f_1(J)$和$K_Q=f_2(J)$曲线，称这两条曲线为该几何形状螺旋桨的水动力特性曲线。

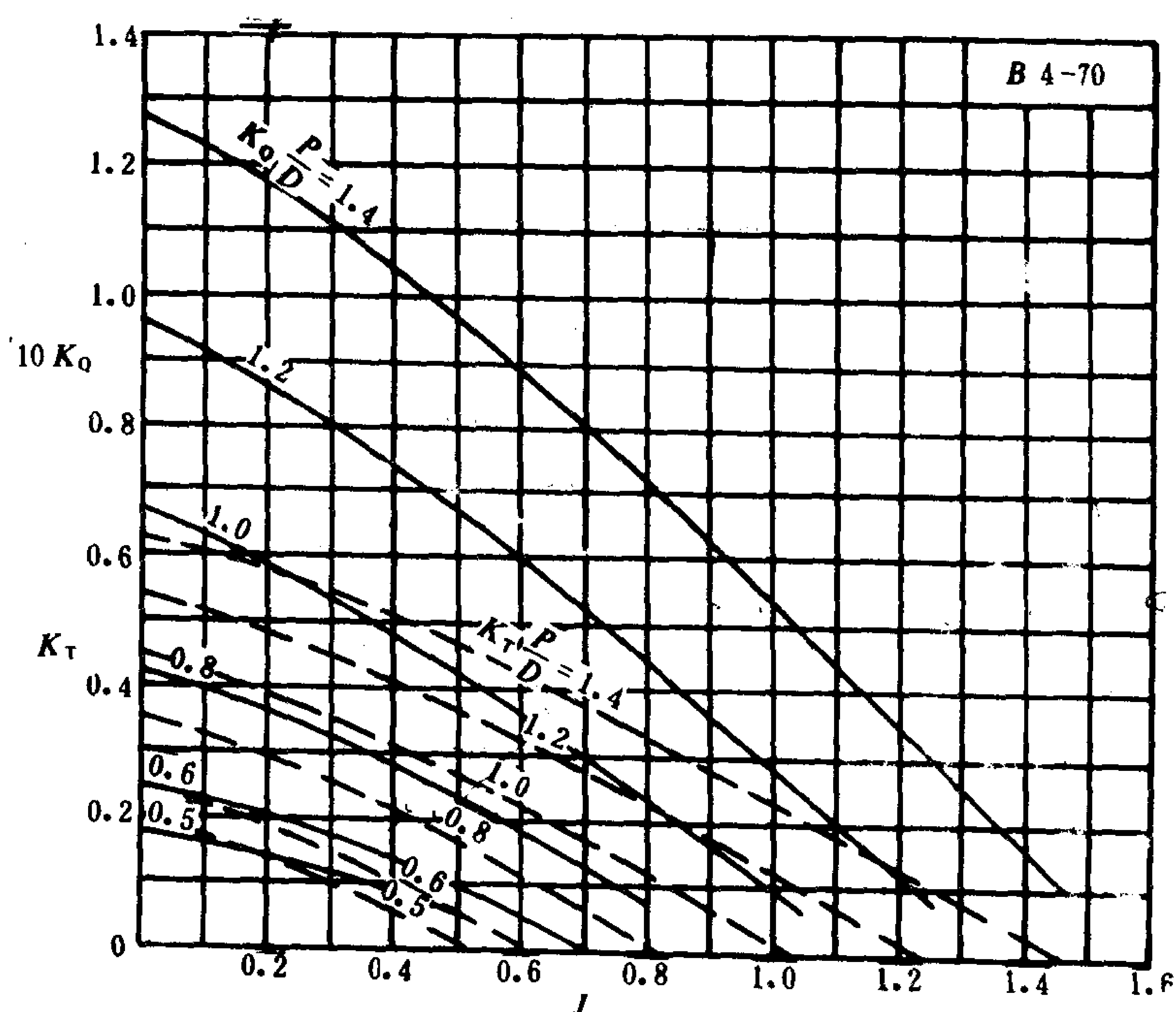


图1.2.4-91　B4-70水动力特性曲线

再做 5 个给定几何形状的螺旋桨，例如：$Z=4$、$\theta=0.40$、$D=0.24$（与上第一个相同）；而$p/D=1.2$、1.0、0.8、0.6、0.5。同理可得其对应的K_T和K_Q曲线。这样就组成了$Z=4$、$\theta=0.40$、$p/D=0.5\sim1.4$的一组桨的水动力特性曲线图谱（图 1.2.4-89）；而图 1.2.4-90 为$Z=4$、$\theta=0.55$、$\frac{p}{D}=0.5\sim1.4$的另一组图谱；图 1.2.4-91 为$Z=4$、$\theta=0.70$、$\frac{p}{D}=0.5\sim1.4$的图谱。3 张图构成$Z=4$、$\theta=0.4\sim0.7$、$\frac{p}{D}=0.5\sim1.4$一个系列桨的图谱。对于实桨，当其与模型几何相似（指叶型和叶剖面形状等），且θ、$\frac{p}{D}$在上述范围内，就可以用内插法查得实桨的K_T和K_Q值，从而求出实桨的T和M_Q值。

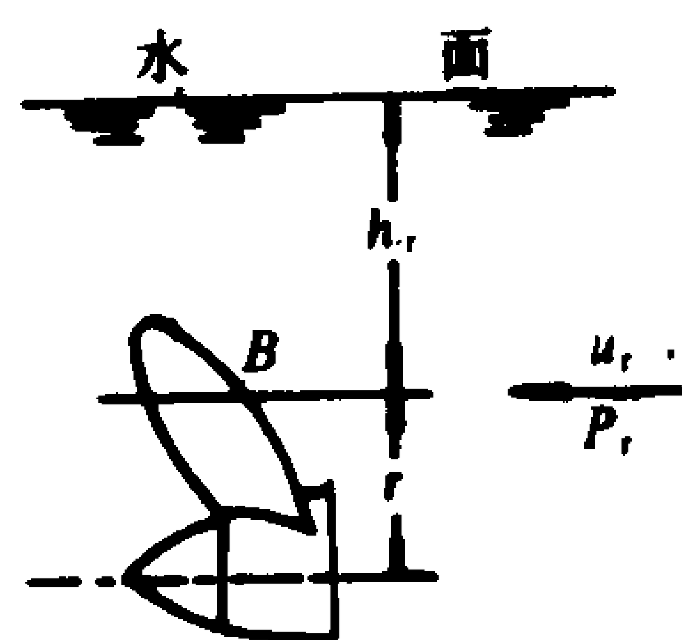


图 1.2.4-92　叶剖面沉深

11.6.2　系列螺旋桨水动力特性图谱

荷兰瓦格宁根船模试验池的B型螺旋桨系列图谱，是效率较高，几何形状范围最广，被广泛应用的图谱。其几何形状范围为：$Z=2\sim7$；$\theta=0.30\sim1.05$；$\frac{p}{D}=0.50\sim1.40$。

日本运输技术研究所AU型系列图谱，特别是改进后的MAU型系列，对空泡性能有所改善。其几何范围为：$Z=3\sim6$；$\theta=0.35\sim0.85$；$\frac{p}{D}=0.40\sim1.60$。

瑞典国家船模池SSPA型系列图谱，具有较简单的几何形状。其几何形状范围为：$Z=3\sim6$；$\theta=0.45\sim0.60$；$\frac{p}{D}=0.55\sim1.15$。

上海船舶运输科学研究所CD型系列图谱，适用于内河及沿海船舶。其几何范围为：$Z=3\sim4$；$\theta=0.35\sim0.60$；$\frac{p}{D}=0.50\sim1.30$。其四叶桨的敞水性能优于B型，三叶桨则不如B型。

11.7　螺旋桨的空泡及强度检验

11.7.1　空泡的起因

如图 1.2.4-92 所示，考察桨叶半径r处叶剖面产生空泡的条件。叶剖面距水面沉深为h_r，u_r为叶剖正车前进时的合速，p_r为远前方处水的压强：

$$p_r=\rho g h_r \tag{1.2.4-98}$$

当来流速度u_r以冲角流向叶剖面时，在叶剖面上取B点，与远前方处流体应用伯努利方程为：

$$p_r+\frac{1}{2}\rho u_r^2=p_B+\frac{1}{2}\rho u_B^2 \tag{1.2.4-99}$$

两处之压力差为：$\Delta p=p_r-p_B=\frac{1}{2}\rho(u_B^2-u_C^2)$或写成：

$$\xi=\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho u_r^2}=\frac{p_r-p_B}{\frac{1}{2}\rho u_r^2}=(\frac{u_B}{u_r})^2-1 \tag{1.2.4-100}$$

式中：ξ——无量纲减压系数，当$\xi>0$表示B点压强低于p_r；当$\xi<0$表示高于p_r，即前者为减压，后者为增压。

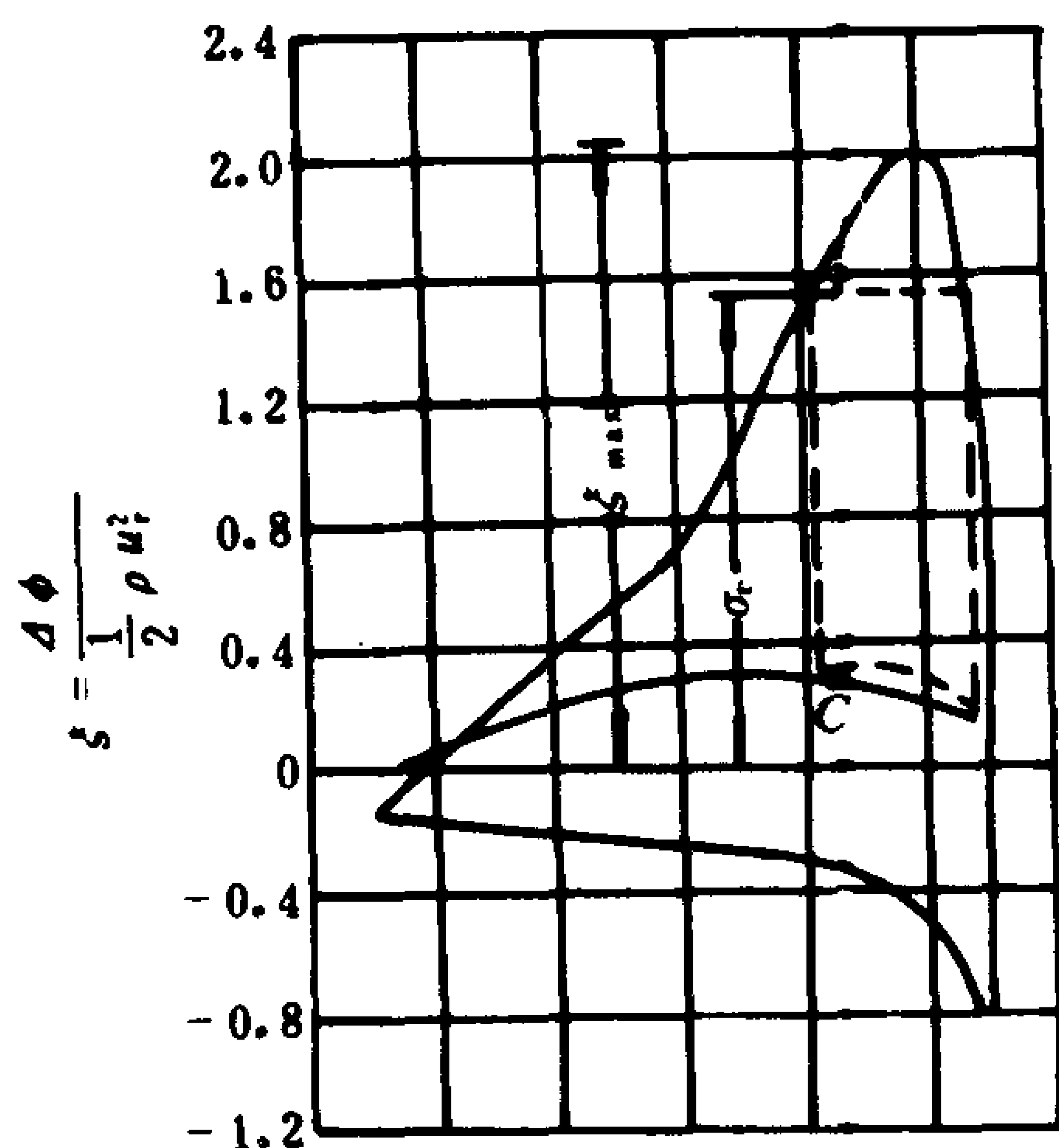


图 1.2.4-93 叶剖面压强分布

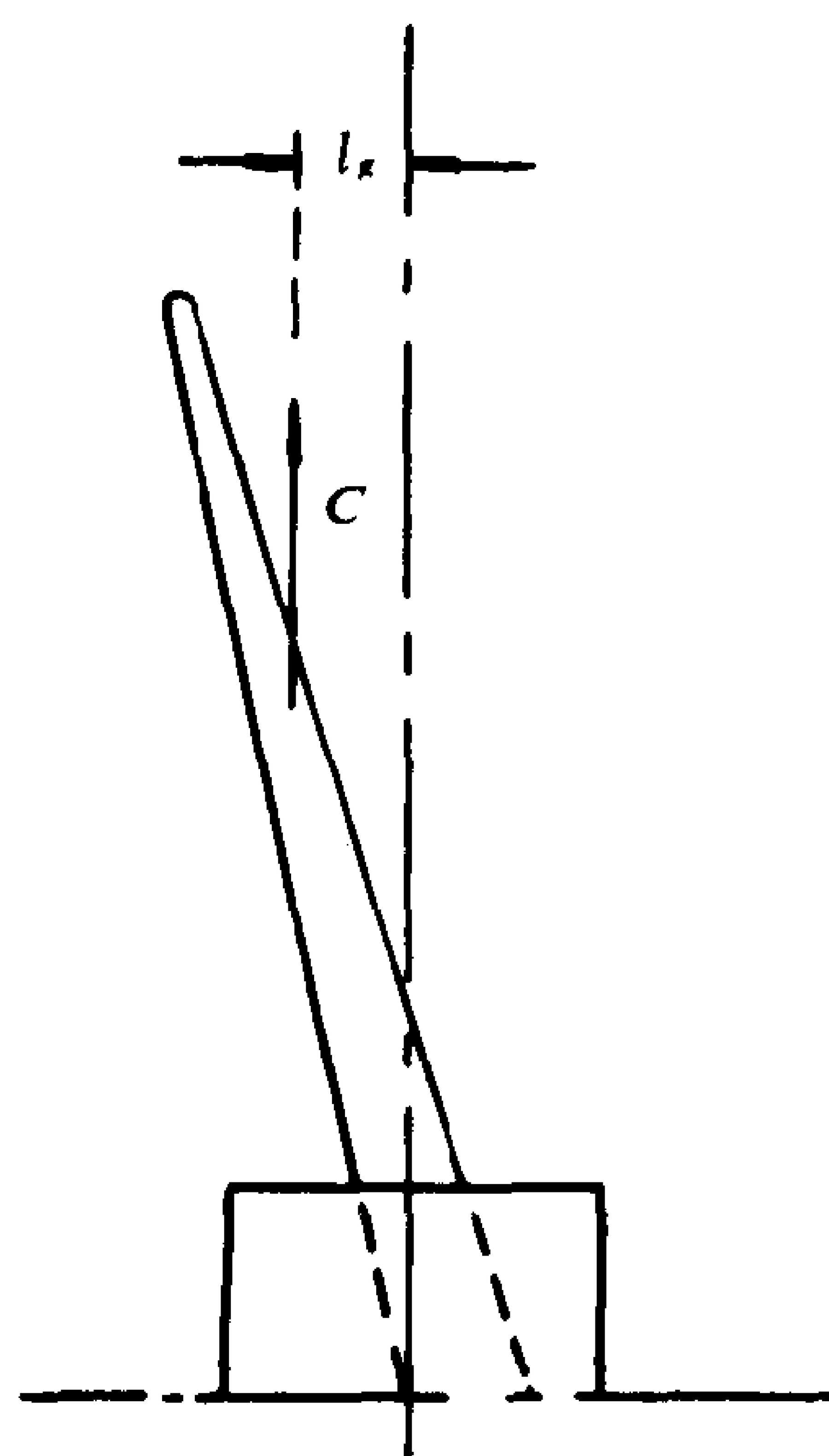


图 1.2.4-94 桨叶的离心力

图 1.2.4-93 为减压系数ξ（即压强p_B）沿叶剖面上下的分布曲线。可见在叶背区压强降低，叶面区压强提高。在接近导边处$u_B = u_{max}$而$p_B = p_{min}$，即有：

$$\xi_{max}=\frac{p_r-p_{min}}{\frac{1}{2}\rho u_r^2}=(\frac{u_{max}}{u_r})^2-1 \quad (1.2.4\text{-}101)$$

在叶剖面上产生空泡的条件为：

$$p_{min} \leq p_V$$

式中：p_V——水的汽化压强（见表 1.2.4-25）

表 1.2.4-25　　水 的 汽 化 压 强

水温℃	5	10	15	20	50	100
p_V kPa	0.873	1.226	1.756	2.335	12.34	101.1

用无量纲系数表达汽化压强时为：

$$\sigma_V=\frac{p_r-p_V}{\frac{1}{2}\rho u_r^2}$$

式中：σ_V为空泡数。

由此得叶剖面上空泡的条件为：

$$\xi_{max} \geq \sigma_V$$

由图 1.2.4-93 可见，在叶剖面叶背的AC区内均存在$\xi \geq \sigma_V$，水由液态变为汽态，形成空泡区，在空泡区内叶背承受的压强均为p_V。随着叶剖面的运动，空泡被相对地推向后方，而该处的压强却大于p_V，使空泡失去了存在的条件而还原成液态，空泡破裂。这种破裂现象发生在 1/100～1/1000 秒的瞬间，冲击力高达 4×10^8Pa，这种内爆式的冲击力反复集中于一点，使材料被剥蚀而损坏，这种现象称为剥蚀现象。此外，空泡使螺旋桨的水动力性能变坏，

效率降低，并产生振动和强烈的噪音。

空泡现象可分为两个阶段：第一阶段是指空泡开始阶段。对推力影响不大，但剥蚀严重；第二阶段：随着来流速度提高，空泡区域不断扩大，占整个叶背的60%～70%，使叶剖面水动力性能恶化；当空泡区扩大到整个叶背时，其水动力性能显著恶化，但空泡将不在叶背破灭，而在叶后尾流中破灭，故第二阶段没有剥蚀现象。

11.7.2 产生空泡的影响因素

（1）叶剖面的沉深

由式（1.2.4-101）可知，p_r增大时，空泡不易产生，故当桨轴心距水面沉深愈深时，有利于避免空泡发生。

（2）叶剖面形状和冲角

剖面的叶厚愈大，导边愈钝，冲角愈大，愈容易产生空泡。

（3）来流速度和转速

在给定叶剖面沉深的条件下，当来流速度u_r愈大时σ_V愈小，将愈容易产生空泡。由图1.2.4-85可见桨叶与水流的相对速度为：$u_r=\sqrt{(2\pi rn)^2+v_A}$，即当转速$n$或进速$v_A$较大时合速$u_r$也较大，将较易产生空泡。

（4）水温

由表1.2.4-25可见，水温愈高，p_V值愈大，空泡数σ_V则较小，易产生空泡。

11.7.3 避免空泡的措施

不论是空泡第一阶段（产生剥蚀）还是第二阶段（推力和效率下降）均对螺旋桨的运转不利。为此应尽力避免之。设计时通常采用：增大盘面比，即增加翼宽以降低ξ_{max}；用低速主机或设置减速箱以降低转速n；改善尾部线型，处理好船体、桨和附体的间距，尽可能使桨处在均匀流场中。对于营运船舶，主要是保证螺旋桨有足够的沉深，据统计为保证推力应取尾吃水为：

单桨船　$T_A=(1.25\sim1.43)D$

双桨船　$T_A=(1.43\sim1.66)D$

T_A——尾吃水

D——螺旋桨直径

11.7.4 螺旋桨的强度

1)作用于桨叶上的弯矩

螺旋桨运转时，受到水对桨叶的推力和转矩，由此可求出桨叶半径r处受到的推力和转矩对该叶剖面的弯矩M_{rT}和M_{rQ}。此外，桨转动时还产生离心力C，在离心力作用下，桨叶剖面将受到拉应力。由于桨叶有一定倾斜角(后斜图1.2.4-94)，桨叶的重心偏离垂线的距离为lg，这样，离心力对叶根处有弯矩M_C。

2)叶剖面所受的应力

将桨叶当作一根悬臂梁，在桨叶强度校验时主要校核叶根处（$r=0.2R$)的强度，有时再校验$0.6R$处就足够了，已知叶根处剖面形状，以及M_{rT}、M_{rQ}、M_C和C，根据梁的纯弯曲理论，即可求出叶剖面上各不同位置的合应力，并找到最大合成压应力σ。

3)许用应力

满足桨叶强度的条件为，叶根处最大合成压应力不超过材料的许用应力，常用螺旋桨材

料的许用应力见表 1.2.4-26。

表 1.2.4-26 **螺旋桨材料许用应力**

材料名称及牌号	密　　度	许用应力	抗拉强度	对海水的	备　　注
	t/m³	9.81×10⁴Pa	9.81×10⁴Pa	抗腐性能	
锰青铜 HMnFe 55-3-1	8.41	450～500	4500～5000	好	表面光滑，可修补
铝青铜 ZHAl 67-5-2-2	8.41	620	6200	良好	表面光滑，可修补
铸钢 ZG25A 2G20A	7.85	450～500	4500～5000	稍差	不易浇铸，表面粗糙，强度计算后须加厚 10%以抗腐蚀
球墨铸铁 QT40-10	7.60	260～280	4000～5500	差	很难修补，叶片比铜质厚 25%～30%
灰铸铁 HT21-40，HT24-44	7.60	190～220（检伸）	1800～2600	差	表面很粗糙，不能修补，叶片比铜质厚 30%～35%
增强塑料（环氧、手涂）	2.50	200～300	2000～3000	差	表面光滑，可修补，叶片比铜质约厚 20%～25%

参考文献

〔1〕盛振邦：船舶静力学，国防工业出版社，1979 年 12 月

〔2〕蒋维清：船舶原理，人民交通出版社，1986 年 6 月

〔3〕中华人民共和国船舶检验局："海船稳性规范"，人民交通出版社，1974 年

〔4〕中华人民共和国船舶检验局："海船抗沉性规范"，人民交通出版社，1974 年

〔5〕"国际海上人命安全公约" 人民交通出版社，1974

〔6〕〔苏〕H. Я. 马涅采夫等著："船舶不沉性理论"，国防工业出版社，1979.12

〔7〕吴仁元："船体结构"，国防工业出版社，1986 年 11 月

〔8〕中华人民共和国船舶检验局："钢质海船入级与建造规范"，人民交通出版社，1983 年

〔9〕姜次平："船舶阻力"，国防工业出版社，1979 年

第3篇 管理基础

第1章 机舱管理

1 机舱日常管理工作

1.1 轮机人员组织和职责分工

随着船舶自动化程度的不断提高，船舶定员数逐渐减少。图 1.3.1-1 是根据近 50 艘通用船舶员资料统计的国际趋势，说明了通用船舶定员数的变化情况。图 1.3.1-2 表示船员人数减少和船舶自动化发展的关系。从图中可以看出，船舶定员由 55 人减少到 18 人，轮机人员由 20 人减少到 5 人。近来挪威、原联邦德国、日本正在试行 14 名定员的船员编制，在一些超自动化船上轮机部高级船员只有 3 名，即轮机长、轮机员、电机员各 1 员。其船舶定员比较表见表 1.3.1-1。

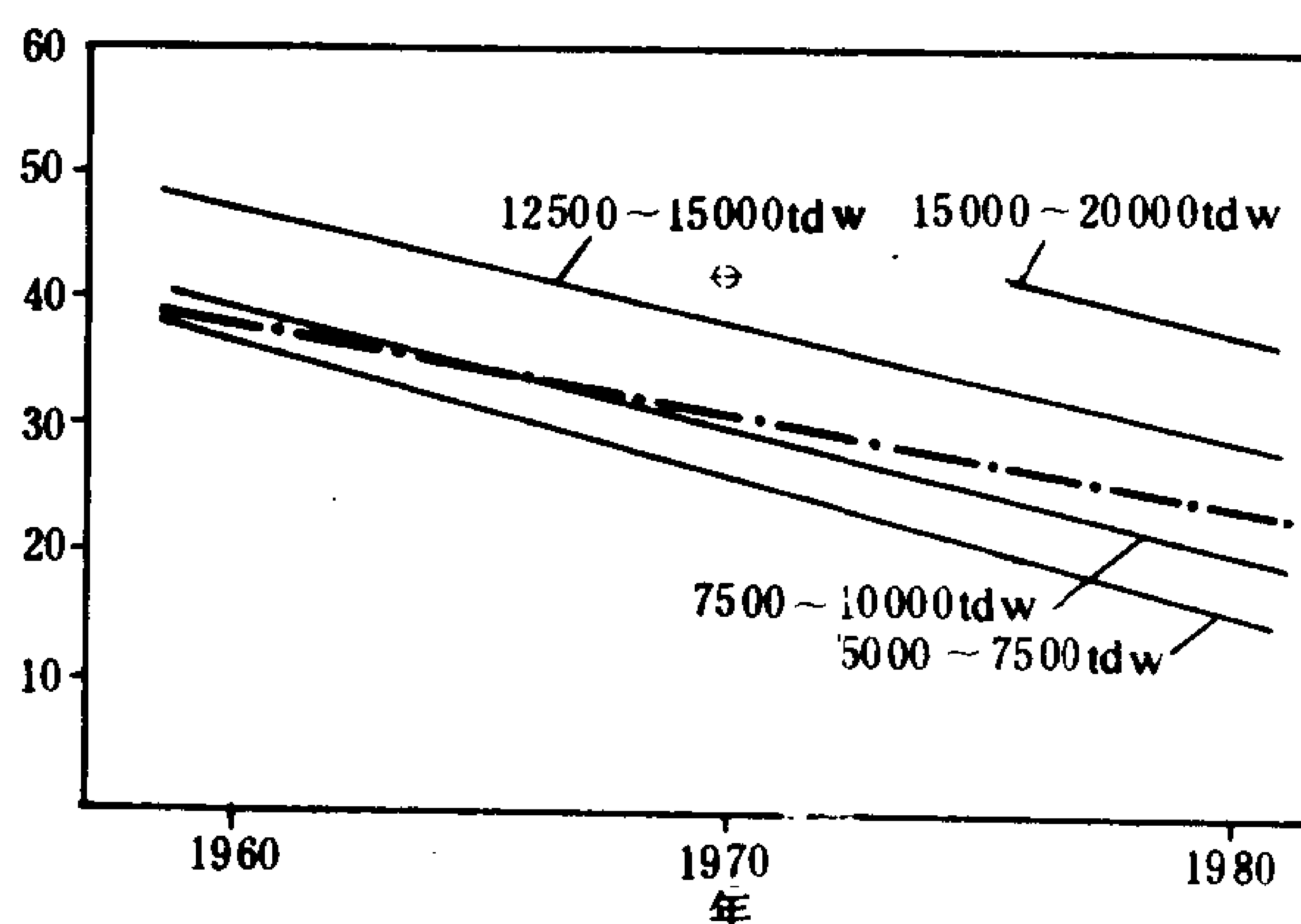


图 1.3.1-1 不同吨位通用船舶定员数的变化情况

表 1.3.1-1 **超自动化船舶定员比较表**

国别 职务	挪 威	原联邦德国	日本		
			A 型	B 型	C 型
船长	1	1	1	1	1
大副	1	1	1	1	1
二副	1	1	1		
三副	1				
轮机长	1	1	1	1	1
大管轮	1	1	1	1	
二管轮	1		1		
电机员		1			
电报员		1	1	1	1
双证书值班员*			2	3	2
水手长		1			

续上表

国别 职务	挪威	原联邦德国	日本		
			A 型	B 型	C 型
通用船员**	5	4	6	6	6
厨司	2	2	3	2	2
总计	14	14	18	16	14

* 机驾合一的船舶值班员需持有驾驶员、轮机员两种证书。

** 具有水手和机工工作能力，可兼任机舱和甲板工作的一般船员。

由于船舶的类型和吨位不同，船舶定员各异，我国海洋船舶中从50多名到18名定员的编制都有，所以轮机人员的组织及职责分工是不完全相同的。

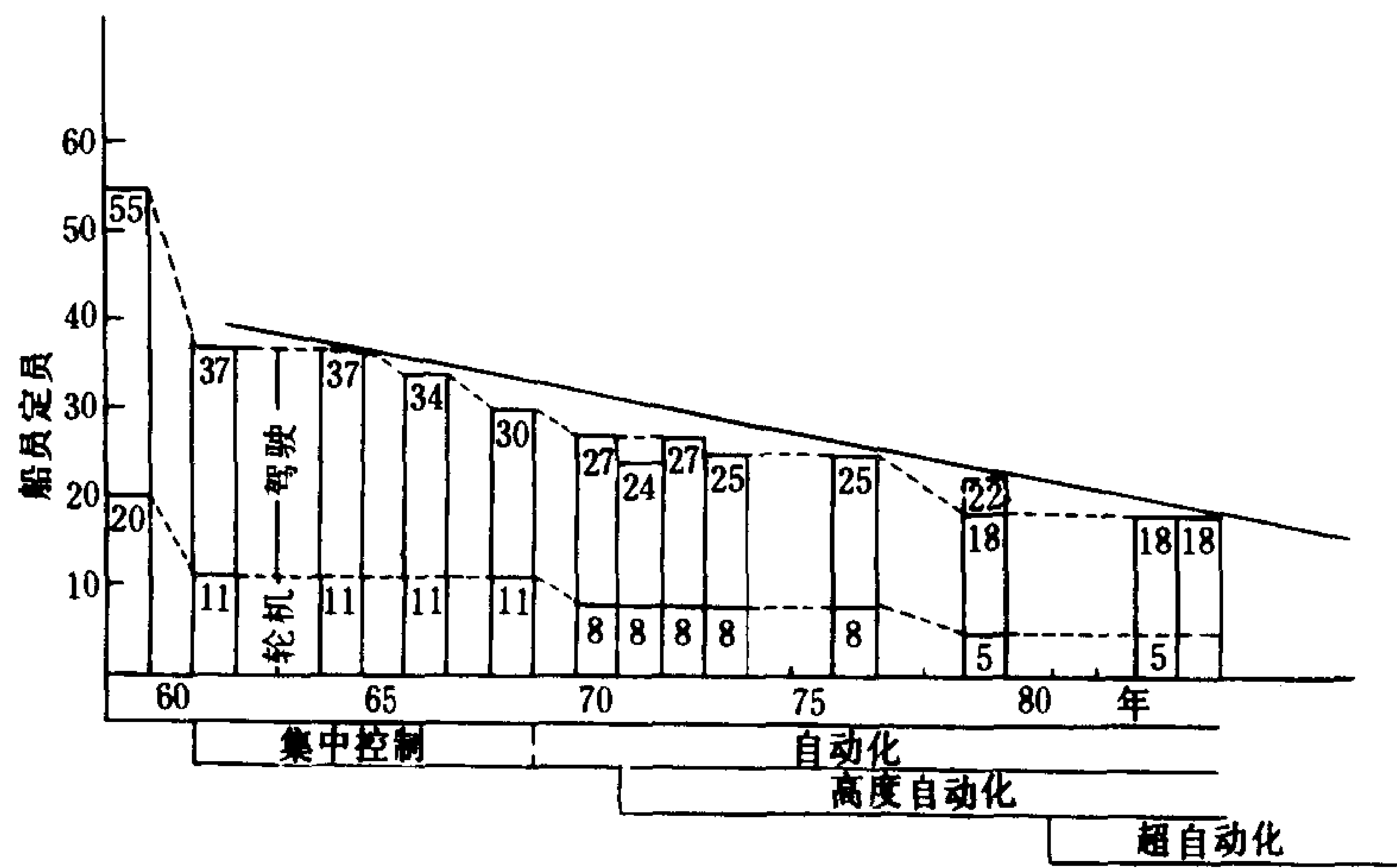


图 1.3.1-2 船舶定员减少的趋势

为了加强海上交通安全管理，保障船舶安全生产和船员的休息与健康，交通部水上安全监督局组织编制了交通部部标准《海船最低安全配员》。其配员表见表 1.3.1-2。

表 1.3.1-2 海船最低安全配员表

船舶种类	船舶总吨位或船舶主机功率	船舶连续航行时间	船长	驾驶员			轮机长	轮机员			水手			机工
				大副	二副	三副		大管轮	二管轮	三管轮	水手长或木匠	一级水手	二级水手	
拖船	150~750 kW	16 h及其以下	1		1		1		1			3		2
		16 h以上	1		2		1		2		1		3	2
	750~3000 kW	16 h及其以下	1		1		1		1		1		3	2
		16 h以上	1		2		1		2		1		4	3

续上表

船舶种类	船舶总吨位或船舶主机功率	船舶连续航行时间	船长	驾驶员			轮机长	轮机员			水手			机工
				大副	二副	三副		大管轮	二管轮	三管轮	水手长或木匠	一级水手	二级水手	
拖船	3000 kW 以上	16 h及其以下	1		1		1		1		1		4	2
		16 h以上	1		2		1		2		1		5	3
三用工作船		16 h及其以下	1		1		1		1			3		
		16 h以上	1		2		1		2			4		
一般船舶	80～200 t 或 150～750 kW	< 8	1				1					3		
		8 ～16	1		1		1		1			3		
		>16	1		2		1		2			3		
	200～1600 t 或 750～3000 kW	< 8	1		1		1		1		1	3		2
		8 ～16	1		2		1		2		1	3		2
		>16	1	1	1	1	1	1	1	1		4		3
	>1600 t或 >3000 kW	≤16	1		2		1		2		1	3	1	3
		>16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	3

注：电报员、电机员按原规定标准配员

1.1.1 轮机人员组织

根据《1978 年海员培训、发证和值班标准国际公约》和《中华人民共和国海船船员考试发证规则》的要求，高级船员或一般船员的证书，应由发证的主管机关按照规定，颁发给在服务、年龄、健康、训练、资格和考试各方面都符合要求的应试者。由于船舶种类和主推进动力装置功率范围不同，以及海船所属公司的管理制度不同，目前我国海船及内河船轮机人员组织的情况大体上如表 1.3.1-3 所示。

表 1.3.1-3　　　　轮机人员组织

轮机人员 \ 主机功率	≥3000 kW	750～3000 kW	≤750 kW
轮机长	1	1	1
大管轮	1	1	
二管轮	1	1	
三管轮	1（油轮 2）	1	
值班轮机员			3
电机员	1	1	
冷藏员	（冷藏货船 1）		
轮助	0 ～ 1	0 ～ 1	
电助	0 ～ 1	0 ～ 1	
电工	0 ～ 1	0 ～ 1	
一级机工	3 ～ 6	0 ～ 6	
二级机工	0 ～ 6		4 ～ 6

1.1.2 职责分工

目前，我国轮机人员职责分工一般沿用 1972 年中国远洋运输总公司制定的《远洋船员职

务规则》、各海运局和输船公司制定的船员职务规则与分工明细表，但是《1978年海员培训、发证和值班标准国际公约》生效以来，特别是1988年交通部决定推行船长负责制以来，适合新形势的职务规则还正在修订之中。

现暂将轮机人员负责检修、养护的主要设备归纳如下：

1)轮机长

轮机长系指负责船舶机械推进职能的高级轮机员，是轮机部的领导人。

2)大管轮

大管轮系指级别仅低于轮机长的轮机员，并在轮机长不能工作时，由其负责船舶的机械推进。其分管的主要设备有：

(1)主机及主机齿轮箱离合器和中间轴系统；
(2)尾轴系统及螺旋桨；
(3)侧向推进机、传动轴及螺旋桨；
(4)可变螺距螺旋桨装置及其系统；
(5)推进装置遥控、自控装置；
(6)主机盘车机；
(7)主机曲轴箱油雾监测报警装置；
(8)主机燃油粘度计及附带装置；
(9)主机滑油系统；
(10)主机冷却系统；
(11)主机燃油加热器、滤器；
(12)主机应急鼓风机；
(13)舵机、操舵仪、太平舵、舵杆销及轴承；
(14)制冷装置；
(15)机舱应急舱底水阀；
(16)机舱修理、焊接、起重等设备。

3)二管轮

二管轮分管的主要设备有：

(1)发电原动机及其附属设备；
(2)空气压缩机、造水机及其海水泵等附属设备，压缩空气瓶；
(3)燃油舱柜、燃油驳运泵、燃油分油机及其加热器。

4)三管轮

三管轮分管的主要设备有：

(1)锅炉及其附属设备（海运局及长航局是二管轮分管）；
(2)起货机；
(3)锚机；
(4)绞缆机；
(5)空调和暖气设备（海运局是大管轮分管空调）；
(6)应急发电站、应急空压机及其原动机；
(7)救生艇的机、轴、车叶和吊艇机；
(8)消防、舱底、压载通用水泵及舱底水油水分离设备；

(9)日用淡水、热水、卫生水水泵、压力柜及其系统;
(10)废油、垃圾焚烧设备及粪便泵和粪便处理装置;
(11)厨房机械、洗衣机械;
(12)炉水舱柜、污水舱柜、机舱污水沟和污水井;
(13)杂用压缩空气瓶,气笛。

5)电机员

电机员负责船舶电气设备的管理、保养和检修工作,主要有:
(1)发电机、电站、电网和照明灯具;
(2)自动锅炉控制箱及附属设备;
(3)主推进装置及其附属设备的电气部分;
(4)各种电动机及其控制箱;
(5)航行灯、信号灯及运河灯的灯泡及电气部分控制装置;
(6)电笛及自动雾笛;
(7)车钟;
(8)船用有线电话,变流机、蓄电池及充电设备;
(9)各种遥控、自控、报警系统、指示仪表、测量设备的电气部分。

1.2 值班轮机员的职责

1.2.1 轮机员值班中应遵守的基本原则(1978年海员培训、发证和值班标准国际公约规定)

1)船舶所有人、船长、轮机长和值班人员注意遵守下列基本原则,以保证在任何时候都能进行安全轮机值班。

2)本规则中“值班”一词,既指“组成值班的小组”,也指“轮机员的责任期间”,在此期间,可以要求也可以不要求他亲临机舱(无人机舱或在港时的轮机员值班可以不要求他亲临机舱)。

3)所有的船舶必须考虑包括下列、但不限于下列的基本原则。

4)总则

(1)每艘船的轮机长应与船长协商,确保值班的安排适合于保持安全值班,在决定轮机值班组成时,可包括合适的一般轮机人员在内。下列项目应特别予以考虑:

①船舶类型;

②机器类型和状况;

③由于情况的变化如气候、水区、污染水域、浅水水域、各种应急情况、船损控制或消除污染而采用的特殊操作方法;

④值班船员的资格和经验;

⑤人命、船舶、货物和港口的安全及环境保护;

⑥国际、国家和当地规章的遵守;

⑦保持船舶正常运行。

(2)在轮机长的指导下,负责值班的轮机员必须按照要求对他职责范围内的一切机器和设备进行检查、操作和试验;负责值班的轮机员是轮机长的代表,在任何时候,他的主要责任都应是对影响船舶安全的机械设备进行安全有效的使用和保养。

(3)轮机长应在与船长协商的情况下,预先确定计划航次的需要,对燃料、淡水、润滑

油、化学品、消耗品和其它备件、工具、供应品的需求以及其他任何的需要加以考虑。

5)操作

(1)负责值班的轮机员应确保既定的值班安排坚持下去。在他的全面指导之下，必须要求机舱值班的一般船员协助使推进机械和辅助设备得以安全和有效的工作。

(2)在轮机值班开始时，应对当时所有机器的运转参数和工作情况加以验证。任何机器如运转失常，预料将发生故障或需特殊处理的情况，应就已经采取的措施做出记录。如果需要，应为进一步的措施拟出计划。

(3)值班轮机员应保证将主推进装置和辅助系统置于经常的监管之下，对机舱和舵机房应按适当的间隔进行检查，并采取相应的措施来排除已发现的故障。

(4)对于需要有人值班的机舱，值班轮机员应随时能立即操纵推进设备以适应变向和变速的需要。

对于定期无人值班机舱，值班轮机员当机舱呼叫照料时，应立即到达。

(5)一切驾驶室的命令必须迅速执行。主推进装置的变向和变速应做记录，除非主管机关认为由于个别船舶的特性和大小，使这种记录行不通时，才可不这样做。当人工操作时，值班轮机员应保证在备车或操作状态下，主推进装置的控制器不间断地受到照料。

(6)值班轮机员不应再被分派或承担任何可能妨碍他对主推进系统及其附属设备的管理任务，而应保证做到使主推进系统和辅助设备处于经常的监管之下，直至他正式交班为止。

(7)应给予一切机器的保养和维护应有的注意，包括机械、电气、液压和空气系统及其控制装置和与此相关的安全设备，一切居住舱室的生活设备以及物料和备品的使用记录。

(8)轮机长应保证做到，将一切预防保养、船损控制或在值班时进行的修理工作等情况通知值班轮机员。值班轮机员应负责切断、旁通和调整他所管辖的将要操作的一切机器，并将已进行的所有工作记录下来。

(9)值班轮机员在下班前，应将一切与主辅机有关的事件相应地记录下来。

(10)为使船舶和船员的安全免遭任何威胁，值班轮机员，在发生火警、机舱可能采取导致船舶减速的措施、舵机即将失灵、船舶推进系统停止运转或供电方面发生任何变化或类似威胁安全的情况时，应立即通知驾驶室。此种通知，如果可能，应在采取行动之前完成，以便驾驶室有最充分的时间采取一切可能的措施避免可能发生的海难。

(11)当机舱处于备车状态时，值班轮机员应保证，一切在操作时可能用到的机器和设备处于随时可用状态，并使电力有充足的储备，以用于舵机和其它需要。

6)值班的要求

(1)值班的每一成员，必须熟悉指派给他的值班职责。此外，每个成员对船舶应具备：

①恰当地使用内部通信系统的知识；

②机舱脱险途径的知识；

③机舱报警系统的知识，特别是关于辨别各种警报与二氧化碳警报的能力；

④有关机舱灭火设备的位置和使用的知识。

(2)在任何时候航行中的值班组织，应适于确保船舶安全运行的所有机器的安全运转，不论是自动还是人工操作，都应适合当时的环境和条件。为此，下列各点应特别予以考虑：

①在任何时候，对影响船舶安全运行的机器都应加以妥善管理；

②遥控推进设备和操舵设备及其控制器的状况和可靠性、控制的位置及程序，包括发生故障或应急时改用人工操作的程序；

③固定的火警控测器、灭火设备或控制火灾的器材的位置和操作方法；

④影响船舶安全航行、系泊或靠泊作业的辅助、备用和应急设备的使用和操作情况；

⑤保持机器设备正常状态的必要方法和步骤，以保证用各种方法操作船舶时，机器能够有效地运转；

⑥由于特殊操作情况可能引起对值班的任何其它要求。

（3）在开敞锚地，轮机长应与船长协商，是否仍按航行时值班。

7)对职责的适任

值班制度不应由于人员疲劳而影响值班工作效率，因此，轮机长在组织值班时，应使航行开始的第一班和其后各班的接班人，都能经过充分的休息，或保证其适任职责。

8)海上环境保护

所有轮机员和机舱一般船员，均应意识到由于操作或偶然事故所造成的海上环境污染的严重后果，并应对这种污染采取一切可能的措施，特别是要采取国际法和港口所规定的措施。

1.2.2 在航时的轮机员值班

1)总则

（1）值班轮机员是轮机长的代表，在所有时间里，他的首要责任是使对船舶安全运行有影响的机器能安全和有效地持续运行。他应确保在所有时间里驾驶室有关变速或换向的命令，能立即执行。

（2）值班轮机员应确保既定的值班安排得以维持。在他总的指导下，要求作为值班组成部分的其他机舱船员能协助推进机械和辅助设备得以安全有效地运转。

（3）值班轮机员应保持对主推进装置和辅助系统进行连续不断的监视，直到交完班为止。他还应确保在机舱和舵机间进行足够的巡视，以利于观察和报告设备的故障和损坏，执行或指导日常调节需要的保养，以及其它必要的工作。

（4）值班轮机员应指导其他值班人员，通知他有关对机器有影响的潜在危险情况，以及危及人命或船舶安全的情况。

（5）值班轮机员应确保机舱是在被监管之下。万一值班人员丧失值班能力时，安排代理人员。值班不能使机舱处于无人监管状况，这将妨碍机舱设备或调节阀的人工操纵。

（6）值班轮机员应采取必要的措施，以控制由于设备损坏、失火、进水、断裂、碰撞、搁浅和其它原因所引起的损害的影响。

（7）值班轮机员应确保所有的值班人员熟悉消防设备和船损控制器材的数量、位置、型式，以及它们的使用方法和各种应予遵守的安全预防措施。

（8）值班轮机员应知道在机舱中能引起伤人的潜在危险，并能进行急救处理。

（9）尽管轮机长在机舱，值班轮机员仍应继续对机舱工作负责，直到轮机长明确通知值班轮机员由他本人承担责任，并且双方都已充分理解。

2)接班

（1）值班轮机员如有理由认为接班轮机员显然不能有效地履行其职责，则他不应交班。遇此情况，他应报告轮机长。接班轮机员应确信本班人员显然完全有能力有效地执行他们的职责。

（2）接班轮机员在他对轮机日志进行检查和核对并与他自己的观察一致之后，才能接班。

（3）接班轮机员在接班之前，至少应彻底弄清下列各项：

①轮机长关于船舶系统和机器运转的固定命令和专门指示；

②对所有机器和系统进行的修理工作的性质和涉及的人员以及潜在的危险;

③使用中的舱底污水或残渣柜、压载舱、污油舱、备用舱、淡水柜、粪便柜的状况和液面高度,以及对其中贮存物的使用或处理的特殊要求;

④在燃油备用舱、沉淀柜、日用柜和其它燃油贮存设备中燃油液位的高度和状况;

⑤有关卫生系统处理的特殊要求;

⑥各种主、辅机系统的操作方法和状况;

⑦在使用中的手动操作监视设备和控制仪表的状况;

⑧在使用中的自动锅炉控制情况,诸如火焰安全控制系统、液位控制系统、燃烧控制系统、燃油供给控制系统和其它与蒸汽锅炉操纵有关的设备;

⑨由于恶劣天气、冰冻、污染或浅水引起的潜在不利条件;

⑩由于设备故障或在不利于船舶的条件下采取的特殊操作方法;

⑪有关分派给机舱一般船员任务的报告;

⑫消防设备的有效性。

3)机器的定期检查

值班轮机员的职责是定期检查他所管辖的机器。这类检查应证实:

(1)主、辅机,控制系统,指示仪表和通信系统的性能良好;

(2)舵机系统和所有的附属装置性能良好;

(3)锅炉和热交换设备中的水位保持在适当高度;

(4)机器和锅炉的排烟表明燃烧性能良好,如有吹扫设备时,烟垢业已吹除;

(5)各污水沟的水位及污物情况正常;

(6)各种管系包括控制系统和机械系统的管系无泄漏,工作正常,并已得到适当的保养;特别对高压油管,给予了应有的重视。

4)轮机日志

在下班前,值班轮机员应确保发生在本班之中有关主、辅机的事件都有适当的记录。

5)预防性和修理性的保养

(1)在进行预防维修、船损控制或维修工作时,值班轮机员应与负责维修的轮机员合作。这包括,但仅限于如下内容:

①针对独立的和旁通的机器;

②维修期间,将其余的设备调节至适当、安全的功能状态;

③为了有利于接班轮机员工作和做好记录,应在轮机日志或其它适当的文件中记下继续运行的设备和与之有关的人员以及由他所采取的安全措施;

④需要时,将已修复的机器或设备进行试验并投入使用。

(2)值班轮机员应确保万一自动设备失灵时,在机舱从事维修的一般船员能协同对机器进行人工操作。

6)驾驶室通知

值班轮机员应注意,由于机器故障引起的速度变化或操舵失效,可能在海上危及船舶和人命的安全。机舱万一失火,可能引起降速,舵机失灵,推进系统停止运行,电力供应发生变化或其它威胁安全的情况,此时应立即通知驾驶室。这种通知,如有可能,应安排在采取行动之前,以便驾驶室有充分时间采取一切可能的行动以避免可能的海难。

7)在拥挤水域航行

值班轮机员当接到船只在拥挤水域中航行的通知时，应确保所有操纵船只航行的机器能即刻置于人工操作的方式。值班轮机员还应保证有足够的备用动力，以供操舵和其它操作之需。应急操舵和其它辅助设备也应准备好，以备立即使用。

8)能见度受限制时的航行

值班轮机员应确保供雾中声号用的持久的空气或蒸汽压力。他应准备好回答驾驶室的任何命令。此外，还应保证备妥用于操纵的辅助机械。

9)呼叫轮机长

(1)在下述情况下，值班轮机员应立即通知轮机长：

①当他判断机器发生的故障或损坏会危及船只的安全运行时；

②当他判断所发生的故障会引起推进机、辅机或监视和调节系统的损坏或破坏时；

③发生紧急情况或对于应采取什么措施或决定无把握时。

(2)除上述情况须要报告轮机长以外，为了机器和船员的安全，值班轮机员应在需要的地方，毫不犹豫地立即采取措施。

10)值班人员

值班轮机员应将保证安全值班的一切适当指示和情况告知值班人员。日常的机器保养工作，作为保持安全值班的一部分的临时任务纳入值班的日常工作制度之内。详细的维修工作，包括电气的、机械的、液压的、空气的或全船可使用的电子设备的修理，应在值班轮机员和轮机长的监视下进行。这些修理应作记录。

1.2.3 在开敞锚地的轮机员值班

当船只在开敞锚地或其它任何实际上是“在海上”的情况时，值班轮机员应保证：

1)保持有效值班；

2)定时检查所有运转和备用的机器；

3)按驾驶室命令使主辅机保持备用状态；

4)采取措施，防止本船污染周围环境，并遵守现行的防污染规则；

5)所有船损控制和消防系统均处于备用状况。

1.2.4 在港时的轮机员值班

该项适用于在港安全系泊或安全锚泊的船舶，对值班轮机员在值班期间的要求；对于具有特种型式推进系统或特殊辅助设备的船舶和装载有害的、危险的、有毒的或极易燃物品或其它特殊货物的船舶，另有特殊的要求。

1)值班安排

(1)各船的轮机长应与船长商议，必须保证轮机员值班的安排适合于保持在港时轮机的安全值班，在决定轮机值班人员的组成时，可包括合适的一般轮机人员在内。下列各项应予考虑：

①船型；

②机器的类型和状况；

③由于天气、冰区、污染水域或浅水水域、紧急情况、船损控制或消除污染等所需采用的特殊操作方法；

④组成值班部分的一般船员的资格和经验；

⑤人命、船舶、货物、港口和周围环境的安全；

⑥国际的、国家的和当地的规章的遵守；

⑦船上正常的日常命令。

（2）在轮机长指导下，值班轮机员有责任对其责任范围内的所有机器和设备在需要时进行检查和测试。

（3）是否设值班轮机员

①所有推进功率为3000 kW或3000 kW以上的船舶，必须经常有一名轮机员负责值班；

②推进功率为1500～3000 kW的船舶，当有驾驶员负责全船值班，并且船上不装有散装危险货物时，经船长指示并与轮机长商酌，可不设轮机员负责值班；

③推进功率小于1500 kW的船舶，只要船上不装载有散装危险货物，则无需轮机员负责值班。

（4）值班的组成，在任何时候，都应足以保证使装卸操作、船舶、港口及其周围环境的安全有关的全部机器能安全运转。

（5）轮机员在负责值班期间，不应再被分配或承担任何职责与任务，以免妨碍他对船上机械系统的监管任务。

2）接班

（1）值班轮机员如有理由认为接班轮机员明显地不能有效履行其职责，则不应交班。遇此情况，他应报告轮机长。接班轮机员应确信本班成员显然完全有能力有效地执行他们的职责。

（2）值班轮机员应于接班轮机员接班前告知以下事项：

①当时的常规指令，有关船舶操作、保养工作、机械或控制设备的修理的特殊命令；

②所有机械和系统进行的修理工作的性质和涉及的人员以及潜在的危险；

③使用中的舱底污水或残渣柜、压载水舱、污油舱、粪便柜、备用柜的液位高度及状态，以及对其中贮存物的使用或处理的特殊要求；

④有关卫生系统处理的特殊要求；

⑤移动式或固定式灭火设备以及烟火探测系统的状况和备用情况；

⑥获准从事机器修理的人员，其工作地点和修理项目，其他获准的人员和需要的船员；

⑦有关船舶排出物，消防工作，特别是对于恶劣天气的临时准备工作的港口规定；

⑧船上与岸上人员可使用的通信线路，包括万一发生紧急事件或要求援助时，与港口当局的通信线路；

⑨其它有关船舶、船员、货物的安全以及防止环境污染等的重要情况；

⑩由于轮机部造成环境污染时，通知有关当局的手续。

（3）接班轮机员在接受值班任务前应：

①他完全明白所有有关操作、保养、机械及控制设备修理的常规指令及特殊命令；

②熟悉现有的和可能有的电、热、水源及其分配情况；

③了解船上的燃油、润滑油及一切淡水供给的可用程度和情况；

④熟悉船上的压载水系统及其操纵；

⑤核实相应的机舱一般船员的出席情况，并了解他们的体力能否有效地履行职责；

⑥了解货物的装卸情况，保养及修理工作状况，以及其它一切对值班有影响的作业；

⑦了解旅客和船员生活、装卸货物、机器运转用水的供应和排出系统的辅机状况；

⑧了解港方对防污染的要求，并能正确操纵船上的设备以满足这些要求；

⑨了解所有安全保护和防火的规定，以及与岸上消防机构的联系方法；

⑩熟悉船上所有探测器和警报系统，以及这些系统动作时相应的反应；

⑪熟悉所有烟火探测、警报和消防系统的配备和操作灭火的方法，船上各类手提式灭火设备的类型及其最有效的使用方法；

⑫熟悉在有危险与有毒气的环境下，为保护生命安全而准备的设备，其放置地点及使用方法；

⑬查清应急急救物品，特别是治疗烫伤和灼伤的物品，应处于备妥可用状态；

⑭了解船上内部的以及船与岸上有关当局之间的一切通信手段；

⑮尽可能地准备好船及其机器，以便在需要时备车或应付紧急状况。

3)值班

(1)值班轮机员应特别注意：

①遵守在他值班范围内的一切命令、有关危险情况及其防范的特殊操作程序和规定；

②各种测试仪表和控制系统，监测所有动力供应设备运行的设备和系统；

③为防止违反地方当局有关污染规定所必需的技术、方法和步骤；

④污水沟的情况。

(2)值班轮机员应：

①在紧急情况下，当他判断情况需要时，拉响警报，并采取一切可能的措施，以避免船只及其货物和船上人员遭受损害；

②了解管理货物的驾驶员在装卸货物时对设备的要求，以及对压载和其它船舶稳定控制系统的补充要求；

③经常巡查以判断可能发生的设备故障或损坏，并立即采取补救措施以保障船只、装卸货、港口及其周围环境的安全；

④保证在其职责范围内采取必需的预防措施，以避免船上各种电气、液压、空气以及机械系统发生事故或损坏；

⑤保证将影响船上机械运转、调节和修理的所有重要事项完整地记录下来。

1.2.5 轮机日志和车钟记录

1)轮机日志是轮机部工作的主要法定记录文件，应每天按顺序逐页记载。

(1)在航行中由值班轮机员填写，记载各主要机电设备的运转参数和工作中的特殊情况，驳油、驳水情况，船长、轮机长的命令，驾驶室的通知，重要的车钟令，本班发生的问题及其处理情况等；

(2)在航行中由二管轮计算填写每天的燃、润料耗存量和正午报告；

(3)在航行中，轮机长须每日认真查阅，进行核对和签署。轮机长还应计算推进器滑失率；

(4)轮机日志中的工作记录栏由大管轮填写，主要记载每天的检修工作，机械设备的损坏及检修情况，各类事故情况，应变演习情况，人员调动情况等；

(5)停泊中由大管轮负责记载并保管；

(6)轮机日志应在船上保存3年，3年后可送公司保管。

2)车钟记录簿是主要法定记录文件，是海事处理的重要文件。字迹应清楚，不得任意删改、涂抹。

设有车钟记录器的船舶，应保持其正常工作，换下来的记录纸经轮机长签署后妥善保管。

1.2.6 恶劣气候条件下航行

船舶在恶劣气候条件下航行时，轮机长应下机舱巡视并指示值班人员做好下列工作：

1)对主机、辅机和舵机等加强检查，保证其正常运行；

2)降低主机转速，防止飞车和超负荷运行；

3)及时对沉淀油柜和日用油柜进行放水排污，并保持其较高油位；

4)使滑油分油机正常运行，保持滑油的清洁；

5)及时清洗脏污的滤器，使燃油和滑油保持正常压力；

6)尽量将分散的燃油集中在少数舱柜内，以减少自由液面；

7)将机舱的行车、工具、备件物料及油桶等可移动的大件物体绑扎固定好；

8)将天窗、通风口、安全孔、油水舱测量孔等密封好；

9)冲洗锅炉水位表，防止假水位；

10)提前排净舱底污水。

1.3 船舶预防检修计划

1.3.1 为保证船舶设备的正常使用，加强船舶设备的管理，轮机人员应按照预防检修计划及时做好船舶设备的预防检查养护自修工作，并接受公司机务监督员或指导轮机长、船队指导轮机长的检查。

1.3.2 船舶的预防检修计划应按照远洋、沿海、内河的《船员职务规则》的分工和《船舶检修养护分工明细表》的规定分工负责进行工作。

1.3.3 预防检修计划应由大管轮负责编制，应按照船舶规范及设备使用说明书中规定的要求和周期，参照《船舶预防检修周期表》(表 1.3.1-4)的规定，结合船舶设备的实际技术状态进行。

表 1.3.1-4　　**船舶预防检修周期表**

轮　机　部　部　分

说明：(1)本表所列项目是船员自修自检部分，并不包括轮机部的一切项目。
(2)本表各项目所列的要求是对船员自修自检的要求，并不包括该项目的全部检修要求。
(3)对于值班检查的内容和平时的加油，活络等一般都不再列入本表中。
(4)表中所列预防检修周期时间是最长时间，一般不应超过。
(5)设备说明书如已有规定的周期、按说明书规定。

预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h	预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h
主机			主机		
气缸和活塞	吊出气缸头、活塞，检查缸头、活塞、缸套等外表情况，清洁、测量、记录。活塞杆填料函、活塞冷却套管填料函，清洁检查间隙调整	6000	推力轴承	检查轴向间隙	8000
十字头轴承	间隙测量调整 十字头销及瓦表面检查	2000 6000	凸轮轴轴承	间隙测量调整	8000
导板和滑块	间隙测量调整	2000	传动链及传动齿	检查活络啮合、润滑情况，链条张紧度、齿隙和轴承间隙测量	1500 6000
连杆大端轴承	间隙测量调整 曲拐销及瓦表面检查	2000 7000	排气阀	清洁、拆检、研磨 定时检查	2000 3000
主轴承	间隙测量调整 下沉量测量	2000 8000	排气转阀	定时检查	3000

续上表

预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h	预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h
主机			主机		
喷油器	清洁、拆检、针阀研磨	1000	机座底脚螺纹	一般检查	3000
高压油泵	清洁、拆检	8000	机身贯穿螺纹	一般检查	10000
燃油凸轮	表面检查，定时核对	3000	涡轮增压器	一般检查	4000
扫气箱	清洁检查	1000	涡轮增压器	换油	按说明书规定
进气阀	清洁、拆检、研磨	10000	气缸油注油器	清洁、拆装	8000
曲轴箱	内部检查	1200	主机淡水冷却器	管子清通（防腐锌板检查视情况而定）	8000
缸头启动阀	清洁、拆检、研磨	8000	主机滑油冷却器	（同淡水冷却器）	8000
启动分配滑阀	清洁拆检	8000	主机空气冷却器	（同淡水冷却器）	6000
启动阀	清洁拆检	8000	十字头滑油增压泵	查漏	1000
限速器	效能检查	3000		清洁、拆检	6000
调节连动装置	活络检查	2000	主机遥控系统	清洁、保养、一般检查	2000
换向机构	一般检查	2000	曲轴拐档	远航船重载后测量，近航船根据情况而定	
发电原动机					
气缸和活塞	吊出气缸头、活塞，检查缸头、活塞、缸套等外表情况，清洁、测量记录	4000	缸头启动阀	清洁、拆检、研磨	4000
进、排气阀	清洁、拆检、研磨	2000	主启动阀	清洁、拆检、研磨	6000
曲拐开档	测量、调整	2500	启动分配器	清洁、拆检	10000
曲拐轴承	间隙测量、调整	2000	操纵机构	活络检查	2000
	曲轴颈及瓦表面检查	4000	地脚螺丝	一般检查	4000
主轴承	间隙测量、调整	8000	贯穿螺丝	一般检查	8000
活塞销及轴承	销及轴承表面检查	4000	排气管消声器	清洁、检查	8000
高压油泵	清洁、拆检	8000	曲轴箱	内部检查	1500
喷油器	清洁、拆检、针阀研磨	1000	滑油泵（自带）	拆除	6000
燃油凸轮	表面检查、定时校对	4000	气缸注油器	清洁、拆检	6000
凸轮轴轴承	间隙测量、调整	10000	淡水泵（自带）	拆检	6000
传动齿轮	检查啮合润滑情况	4000	海水泵（自带）	拆检	6000
	间隙测量	10000	蜗轮增压器	一般检查	4000
淡水冷却器	管子清通，防腐锌板检查视情况而定	8000		换油	按说明书规定
滑油冷却器	同淡水冷却器	8000			

续上表

预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h
其它机械		
主海水泵（1）	解体检查弹子盘、水密环、填料铜套、叶轮、泵壳等情况和运动部件的磨损情况	8000
主淡水泵	同(1)	8000
主活塞水泵	同(1)	8000
主油头水泵	同(1)	8000
主机油泵(2)	一般检查，旁通调节阀拆检	8000
主燃油输送泵(3)	解体检查轴承、油封圈、齿的端面间隙、啮合情况及安全阀等	8000
主凸轮油泵	同(3)	8000
主齿轮箱油泵	同(2)	8000
主离合器油泵	同(3)	8000
货油泵	同(2)	6000
燃油驳运泵	同(3)	6000
滑油驳运泵	同(3)	8000
气缸油驳运泵	同(3)	8000
消防泵	同(1)	4000
舱底泵（通用泵）	同(1)	4000
往复式舱底泵	解体检查测量，唧筒、阀箱和传动各部分阀研磨	4000
扫舱泵	解体检查、测量	8000
机油分油机	解体检查弹子盘、平衡弹簧，联轴器磨擦片、齿轮箱、自动齿轮油泵、安全阀等各部分	5000
燃油分油机	同上外，自动清洗系统孔道清通	4000
	曲轴箱检查，进、排气阀检查研磨，高、低压空气冷却器管子清通。	5000

预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h
其它机械		
主空气压缩机	吊出缸头、活塞，清洗测量活塞、缸套、活塞环、连杆大端轴承等、自带机油泵、冷却水泵及气缸注油器清洁、拆检	5000
应急空气压缩机	运转试验 解体检查	每　月 每三年
造水器加热器	化学清洗 检查	4000 每年
造水器海水泵	同(1)	4000
造水器凝结水泵	同(1)	5000
造水器真空泵	同(1)	4000
伙食冷藏压缩机	进排气阀清洁、研磨，冷却器管子清通，曲轴箱检查，解体清洁、检查、测量活塞、轴颈、缸套、轴封、油泵等	3500 7000
伙食冷藏系统	检查密封情况	1500
伙食冷藏海水泵	同(1)	8000
空调压缩机	进排气阀清洁、研磨，冷却器管子清通，曲轴箱检查，解体清洁、检查、测量活塞、缸套、轴颈、轴封、油泵负荷控制机构等	3000 6000
空调海水泵	同(1)	8000
空调系统	检查密封情况	1500
废气锅炉汽水鼓	内部清洗、检查	8000
辅助锅炉汽水鼓	内部清洁、检查 喷油器设备清洁检查	8000 700
辅助锅炉自控系统	清洁、保养、检查	2000
锅炉给水泵	同(1)	6000
锅炉循环水泵	同(1)	6000

续上表

预防检修项目	要求	预防检修周期 h
其它机械		
锅炉燃油泵鼓风机	拆检、清洁	6000
锅炉冷凝器	管子清通，防腐锌板检查视情况而定	6000
热水井	毛巾布或其它过滤材料视情况清洗或换新	
日用加热器	清洗	每年
日用海水泵	同(1)	每年
日用淡水泵	同(1)	每年
日用热水循环泵	同(1)	每二年
日用卫生压力水柜	清洗	每二年
日用淡水压力水柜	清洗	每二年
粪便泵	拆检	8000
油水分离器	内部清洁	每年
起货机	检查起货刹车离合器摩擦片（或橡皮填料）、齿轮的啮合情况及油位	每次到港装卸货前
旋转起重机、行车吊	同上	同上
起锚机	检查齿轮箱齿轮啮合情况、油位	每次到港前
绞缆机	同上	半年
燃油日用柜	清洁检查	每年
燃油沉淀柜	清洁检查	每二年
轻油日用柜	清洁检查	每二年
气缸油贮存柜	清洁检查	每二年
机油循环柜	清洁检查	每二年
机油贮存柜	清洁检查	每四年
应急柴油消防泵	解体检修每月试验一次	每三年
应急发电机	解体检修每月试验一次	每三年
机动救生艇机	解体检修每月试验一次	每三年
机房水密门	试验开关是否灵活	每月
应急舱底水阀	同上	每年

预防检修项目	要求	预防检修周期 h
其它机械		
上甲板紧急关油机构	同上	每半年
上甲板锅炉紧急放汽机构	试验操作是否灵活	每半年
上甲板锅炉紧急停汽机构	同上	每半年
蒸发器汽缸安全阀	检查灵活性及正确性	每年
蒸汽及压缩空气减压阀	同上	每半年
电气设备		
通则(1)	普查全船电气设备绝缘状态并作好记录	每年
(2)	普查全船动力电网、照明电网、主干线路绝缘状态并作好记录	每年
(3)	校核全船电机过载保护以及熔断器容量	每年
(4)	检查全船开关、插头、插座	半年
(5)	检查试验应急切断开关	每年
主配电板	清洁检查电接头触头绝缘子、仪表误差值，校核发电机过载失压逆功率保护装置，试测并联运行有功率、无功功率的分配稳定性	每年
主发电机	清洁整流子、滑环、刷握、碳刷以及其它所能及的部位，检查绝缘平衡电阻电接点、碳刷长度、弹簧压力、整流子或滑环的圆滑度、火花等级温升、轴承或轴瓦的运行温度间隙测量	每季度
应急发电机及其配电板	同主发电机主配电板 试验应急自动启动是否符合技术要求	每季度 每　月
蓄电池	清洁检查液位、比重、电压、常规充放电，添补电解液 过充电应急供电试验	每季度 每　年

续上表

预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h
电力拖动		
控制箱启动箱	清洁检查电接点触头外表、除锈，按钮开关，活络有关机械，适当润滑校正继电器动作时间，检查保护继电器的可靠性、故障声警报的准确性	每半年
电动机	清洁整流子滑环、冷却风道，检查消除振动火花绝缘，测量电刷压力及电刷架，调整轴承工作状态检查及加油电磁刹车可靠性，检查电接点，清洗检查局部的体清洁检查千瓦以下电机全部解体、清洁检查	每年
锚机，绞缆机	检查水密试转	每航次
舵机系统	校正舵角指示器准确度，手动自动试转，校正随动系统灵敏度	每航次
助航仪器的交流机	试转工作状态检查	每航次
机舱泵拖动电机	绝缘及工作电流等一般检查	每次离港前
其它机舱设备拖动电机	同上	每航次
起货机械电机	水密检查，绝缘检查，试转	每次到港前
货舱盖设备油泵拖动电机	绝缘检查，试转	每次到港前
油泵拖动电机	绝缘检查、试转	到港首次使用前
吊艇机	限位开关、活络，水密检查，拖动电机绝缘检查试转	每月
其它甲板机械拖动电机	水密检查，绝缘检查，试转	每月
锅炉系统	清洁光电管，检查控制线路绝缘状态，调整点火棒间隙，水密检查	每季度
风机系统	检查风叶损伤程度，检查电机底座螺丝和角铁	每半年

预防检修项目	要　　求	预防检修周期 h
电力拖动		
升降机	检查限位开关，活络有关机械，适量润滑	每半年
机舱行车	检查刹车可靠性	每季度
生活设备拖动电机	检查绝缘状态，检查接地线情况	每季度
其它电气设备		
机舱报警器装置	试验不良者修理、清洁	每次离港前
救生警报装置	试验不良者修理	有坏立即修理
火灾警报装置	试验不良者修理	有坏立即修理
声力电话	试验不良者修理、清洁	每季度
自动电话	清洗检查调整	每年
车钟	清洗检查调整	每次离港前
气笛	检查绝缘水密	每次离港前
自动雾笛	控制系统清洁、检查时间调整	每航次
航行灯信号灯	绝缘检查，照度调整，光色调整	每次离港前
照明变压器	清洁，检查无功损耗，冷却情况、绝缘状态	每半年
普通照明	检查接地线甲板灯，注意水密排除接地	每月
应急照明	排除接地试验	每月
运河灯	检查绝缘水密	过运河前
装货灯、机舱工作灯	检查绝缘水密，检查安全阀	每次到港前
各种电气指示仪表	解体、检查、清洁、调整	每年
厨房电热器	检查绝缘状态，检查接地线	每季度
电影机	清洁、检查、调整	每季度

1.3.4 实行循环检验的船舶，预防检修计划应与循环检验计划结合起来。

1.3.5 远洋船舶的预防检修计划，分为年度计划和航次计划两种；沿海及内河船舶的预检计划分为年度、月度、航次计划三种。

1.3.6 船舶预防检査养护自修工作要保证质量，实行各级管理和技术负责人逐级验收制度。

1.3.7 应建立预防检修的各种记录，轮机长应对其进行审核。

1.3.8 公司船技处应负责做好以下工作：

1)由指导轮机长或机务监督员检查船舶各种自修计划的完成情况和各项记录，对于工作中的困难应及时给予帮助解决，并对船员进行技术指导。

2)提供和编制主要设备的磨损极限标准。

3)制定检修工作记录、测量记录等各种表格。

4)会同有关部门帮助船舶解决自修必要的备件、工具和材、物料。

5)必要时联系调度部门给船舶航次停泊检修，安排必要的时间。

1.4 热工测试与调整

1.4.1 为了使主机能安全、均衡地运转，减少燃油消耗和机械损耗，发挥其最大效率，必须定期测量主机各种运转参数，及时进行调整和检修。

1.4.2 测试的主要参数有：

1)转速（包括增压器转速、柴油机转速）；

2)排烟温度；

3)扫气压力；

4)冷却水温度和压力；

5)润滑油温度和压力；

6)燃油粘度、温度、流量和压力；

7)指示功率和制动功率；

8)烟气分析。

1.4.3 主要测试设备：

1)机械示功器用以测取气缸示功图；

2)柴油机工况监测系统（DETS），监测气缸压力和喷油压力，计算指示功率；

3)柴油机工况监视系统（MIP），显示示功图，计算出指示功率；

4)扭力仪测取柴油机轴功率、扭矩和转速；

5)最高压力计测取爆炸压力；

6)烟度计测取与分析排气成分；

7)流量测量在船上常用体积法和流量计，以测量燃油消耗量；

8)使用常规压力表和压力传感器，测取各种压力；

9)使用常规温度表和温度传感器测取各处温度。

1.4.4 根据热工测试数据，进行下列调整：

1)调整喷油定时、喷油量和喷油启阀压力，保证各缸均衡运转；

2)调整气阀定时、气阀间隙，保证各缸正常换气；

3)调整各缸压缩压力

1.4.5 主机工作时间累计每隔 700 h，应至少测取一次全部气缸的示功图，对可能有问题的

气缸、检修过或调整过的气缸应及时测取示功图。

1.4.6 测取和计算示功图，一般由轮机长亲自操作，测取时应每缸连续测两份，分别按顺序贴在功率测量记录表上，一份报送公司船技处，一份存船。

1.4.7 测试仪表应定期进行校正。

1.5 备件和物料的管理

1.5.1 备件数量的最低限额

各公司一般都制订有各种备件船存量的定额，这是根据设备的技术状态、船舶的营运情况、备件的生产和供应情况确定的。合理的备件数量既要保证航行安全又不过多积压资金。

我国《钢质海船入级与建造规范》及其它国家的船级社都对船舶主要机械设备，如主柴油机、发电柴油机、锅炉、舵机、制冷机等的备件数量最低限额做了明确规定。备件数量是否满足其最低限额要求，也是船舶是否适航的条件之一。

1)主柴油机的备件表，见表 1.3.1-5;

2)辅柴油机的备件表，见表 1.3.1-6;

3)主、辅汽轮机备件表，见表 1.3.1-7;

4)独立驱动的空气压缩机备件，见表 1.3.1-8;

5)主锅炉和重要用途辅锅炉备件，见表 1.3.1-9;

6)泵的备件，见表 1.3.1-10;

7)轴系备件，见表 1.3.1-11;

8)制冷装置的备件，应不少于表 1.3.1-12 的规定。

表 1.3.1-5　　主柴油机备件表

项　　目	备　件　名　称	备件数量	
		无限航区	有限航区
主轴承	每种尺寸和型式的一个轴承或壳体，包括所有垫片和螺帽总成	1	1
主推力轴承	单环式推力轴承的推力块或滚柱推力轴承的内外垫圈	1套	1套
气缸套	气缸套，包括密封环和垫圈总成	1	1
气缸盖	气缸盖，包括阀、密封环和垫片总成，对无缸盖的机器，每一个缸组的各种阀	1	1
	一个缸的气缸盖所需的螺栓及螺母	1/2套	1/2套
气缸阀	一个气缸的排气阀，包括阀套、阀座、弹簧和其他附件总成	2套	1套
	一个气缸的进气阀，包括阀套、阀座、弹簧和其他附件总成	1套	1套
	起动空气阀，包括阀套、阀座、弹簧和其他附件总成	1	1
	安全阀总成	1	1
	一台机的每种尺寸和型式的燃油阀，包括所有附件总成	1套	1/2套
连杆轴承	一个气缸的每种尺寸和型式的下端轴承或轴承壳，包括垫片、螺栓和螺母总成	1套	1套
	一个气缸的每种尺寸和型式的上端轴承或轴承壳，包括垫片、螺栓和螺母总成	1套	1套

续上表

项目	备件名称	备件数量	
		无限航区	有限航区
活塞	十字头式：每种型式的活塞，包括活塞杆、填料函、刮油环、活塞环、螺栓和螺母总成	1	1
	筒形活塞式： 每种型式的活塞，包括刮油环、活塞环、螺栓、螺母、活塞销和连杆总成	1	1
活塞环	一个气缸的活塞环	1套	1套
活塞冷却	一个缸组的套管冷却管和附件，或其他相当的设备	1套	1套
凸轮轴传动齿轮和链环	齿轮传动： 一台机的传动凸轮轴的齿轮 链轮传动： 每种尺寸和型式的连接销子和滚柱的可拆链环 每种型式的轴承衬套	 1套 6 1套	 — 6 —
气缸注油器	链轮或齿轮传动的最大注油器总成	1	—
喷油泵	喷油泵总成或当在海上能够更换时，一台泵工作部件的组合件（柱塞、柱塞套、阀、弹簧等）	1	1
喷油管	每种尺寸和型式的高压燃油管，包括接头总成	1	1
扫气鼓风机 （包括涡轮增压器）	转子、转子轴、轴承、喷嘴环、齿轮或其他型式的相应工作部件 注：如一台鼓风机发生故障，但机器能保持船舶操纵所要求的功率时，则备件可省略 一台鼓风机发生故障时，应在船上配备机器运转所需的盲板或盖板装置	1套	—
扫气系统	每种型式一台泵的进排气阀	1套	—
减速和/或倒车齿轮	在齿轮箱中的每种尺寸轴承衬套	1套	1套
	在齿轮箱中的每种尺寸滚子或球座圈	1套	—
主机带动空气压缩机	每种尺寸活塞环	1套	—
	每种尺寸的进排气阀总成	1/2套	—
垫片和填料	一个气缸的气缸盖和气缸套的每种尺寸和型式的特制垫片和填料	—	1套

表 1.3.1-6 **辅柴油机备件表**

项　　目	备　件　名　称	备　件　数　量	
		无限航区	有限航区
主轴承	每种尺寸和型式的一个轴承的主轴承或壳体，包括垫片，螺栓和螺母总成	1	1
气缸阀	一个气缸的排气阀，包括阀套、阀座、弹簧和其他附件总成	2套	1套
	一个气缸的空气进气阀，包括阀套、阀座、弹簧和其他附件总成	1套	1套
	起动空气阀，包括阀套、阀座、弹簧和其他附件总成	1	1
	安全阀总成	1	1
	一台机的每种尺寸和型式的燃油阀，包括所有附件总成	1/2套	1/2套
连杆轴承	一个缸的每种尺寸和型式的下端轴承或轴承壳，包括垫片、螺栓和螺母总成	1套	1套
	筒形活塞式：一个气缸带有衬套的活塞销	1套	—
活塞环	一个气缸的活塞环	1套	1套
活塞冷却	一个缸组的活塞冷却附件	1套	—
喷油泵	喷油泵总成或当在海上能更换时，一台泵工作部件的组合件（柱塞、柱塞套、阀、弹簧等）	1	1
喷油管	每种尺寸和型式的高压燃油管，包括接头总成	1	1
	一个气缸的气缸盖和气缸套的每种尺寸和型式的特制垫片和填料	1套	1套

表 1.3.1-7 **主、辅汽轮机备件表**

项　　目	备　件　名　称	备　件　数　量	
		无限航区	有限航区
主轴承	一台机的转子轴，小齿轮轴和大齿轮轴的每种尺寸和型式的轴承衬套	1	—
汽轮机推力轴承	单环推力轴承每种尺寸的单面推力块，或一台机的每种尺寸可调轴承环，包括相配的衬套（如安装时）	1套	—
主推力轴承	单环推力轴承的单面推力块，或滚子推力轴承内、外座圈（如装有时）	1套 1	1套 1
汽轮机轴密封环	一台机每种尺寸和型式的密封装置的包括弹簧的碳精密封环（如安装时）	1套	—
滤油器	每种尺寸和型式的可清理的滤器元件	1套	—

表 1.3.1-8 **独立驱动的空气压缩机备件**

项　　目	备　件　名　称	备　件　数　量
		无限和有限航区
活塞环	一个活塞的每种尺寸的活塞环	1套
阀　组	每种尺寸的吸气阀和排气阀总成	1/2套

表 1.3.1-9　　　　主锅炉和重要用途辅锅炉备件

项　　目	备　件　名　称	备件数量	
		无限航区	有限航区
管盖和管塞	锅炉烟管、过热器管和经济器管用的每种尺寸的管盖和管塞	10	6
燃烧器	一个锅炉的整套燃烧器	1套	1套
水位表	圆形玻璃水位表	每炉2套	每炉2套
	平板形玻璃水位表	每炉1/2套	每炉1/2套
安全阀	每种尺寸弹簧	1套	—

表 1.3.1-10　　　　泵 的 备 件

项　　目	备　件　名　称	备件数量
		无限和有限航区
往复泵	每种尺寸的阀，包括阀座和弹簧	1套
	一个活塞的每种尺寸和型式的活塞环	1套
离心泵	每种尺寸和型式的轴承	1
	每种尺寸和型式的旋转密封装置	1
齿轮泵、螺杆泵	每种尺寸和型式的轴承	1
	每种尺寸和型式的旋转密封装置	1

表 1.3.1-11　　　　轴 系 备 件

项　　目	备　件　名　称	备件数量
		无限和有限航区
联轴器螺栓	对抽出螺旋桨轴需要拆除的联轴器螺栓和螺母	1套

表 1.3.1-12　　　　制 冷 装 置 备 件

备件名称	数　　量
(1)往复式制冷压缩机备件	
活塞包括连杆的装配完整件	每种尺寸型式1套
连杆小头衬套	同型机为2台时，按1台机所需的配1套，但多于2台时，每多一台机增加1/4套。
连杆大头轴瓦	同型机为2台时，按1台机所需的配1套，但多于2台时，每多一台机增加1/4套。
活塞销及其固定的零件	同型机为2台时，按1台机所需的配1套，但多于两台时，每多一台机增加1/4套。

备件名称	数量
曲轴法兰连接螺栓	每种尺寸各1套。
轴封的易磨损零件	每台机1套。
组装好的进气阀及排气阀组（包括假盖弹簧）	2、3、4缸压缩机备1组；6、8缸压缩机备2组。
气缸套	同型机为2台时配置2只；但多于2台时，每多2台机增加1只。
活塞环（密封环及刮油环）	同型机为2台时，每台机各1套，但多于2台时，每多1台机增加1/2套。
主轴承、轴瓦、螺栓和螺母	每台机不同尺寸各1付。
进排气阀片	每台机1套。
橡胶、塑料模压件	同型机为2台时，每台机各1套，但多于2台时，每多1台机增加1/2套。
压缩机用填料	金属填料每台机1套。
传动皮带	每型1套。
（2）泵及风机备件	
冷却水泵及盐水泵的吸入、排出截止阀	各1只。
盐水泵的轴、叶轮及整副轴瓦	每型1套。
冷风机的叶片式叶轮、轴及轴承	每型1套。
（3）电动机联轴节的螺栓和垫圈	每种尺寸联轴器1套。
（4）调节阀备件：。	
气体调节阀	每种尺寸1只。
浮球调节阀	每种尺寸1只。
（5）安全阀、膜片及易熔塞备件	
安全阀装配完整件	每种尺寸各1只。
安全阀弹簧	每种尺寸各1根。
安全膜片	每种尺寸各6片。
易熔塞	每种尺寸各3只。
（6）检测仪表备件	
电测式或套管式温度计	总数的5%，但每种型式应不少于2只。
电测温度指示器的备用电池组	1组。
标准温度计	2只。
压力表	各种型式1只。
盐水比重计	1只。
R12、R22或R502制冷剂的检漏灯	1只。

1.5.2 备件的申请、消耗报告

1)备件申领

（1）轮机备件的年度申购计划，应根据备件定额、船存数量、检查测量记录、实际技术状况和消耗规律，由各主管轮机员提出，经轮机长汇总审核、船长签署后，于每年2月底前上报公司。对于生产周期长的重大部件及非常用备件，应不迟于6个月以前向公司提出申请。

（2）申领备件应根据修船计划、年度检修计划、航次计划和船存情况统筹考虑。

（3）船舶在国外港口，需要计划外的少量急用备件，原则上应请示公司或驻外代表批准。特殊情况下如来不及请示，经轮机长与船长研究后决定购买，但应及时将原因和订购情况报告公司。

2)备件消耗报告

凡新领到备件或消耗备件时，轮机长应及时填写《备件报告表》，向公司书面报告情况。

1.5.3 备件的订购

1)订购备件，一般情况下由公司向备件制造厂或船舶供应商询价和选购；有时经公司主管部门批准，轮机长也可直接订购。

2)订购备件时，必须提供本船和机型的详细资料，以便船舶供应商查找到所需要的备件。

如订购主柴油机备件，在订购单上应提供下列资料：

(1)船名（包括原船名）；

(2)船级社；

(3)主机机型和气缸编号；

(4)主机编号；

(5)主机制造厂；

(6)出厂日期。

3)使用备件编号册（CODE BOOK）可以迅速准确地购到所需要的备件，因此熟练地使用编号册是十分重要的。如订购 SULZER 6RLB66型主机的备件，根据其编号册填写订购单，见表 1.3.1-13。

表 1.3.1-13　　订购单（ORDER LIST）

ITEM	CODE No.	NAME	QUANTITY	UNIT
1	R 34401	Piston ring	6	set
2	R 34101	Piston head	1	Pc
3	R 55330	Plunger with bush, complete for fuel injection pump	2	set

4)备件质量有时差别很大，由于备件来源不同，有原制造厂生产的，有备件厂加工的，还有翻修变新的，所以要严格把好质量关，做好备件验收工作，对型号不符、质量不合格的备件，应及时退货。

1.5.4 备件的管理

1)船舶应建立备件清册，一式两份，一份由轮机长保管填写，另一份存公司主管部门；轮机员也应备有清册，记载各自主管的备件账目。

2)各种备件应有专人保管，妥善放置于固定处所，做好备件的衬垫、包扎和防锈工作。

3)更换备件应认真检查和测量，经轮机长同意后方可更换。

4)除非影响航行安全，凡更换重大备件应事先请示公司同意。

1.5.5 船舶物料的申请和管理

1)许多国家的船舶供应商和船舶公司都编制有船舶物料手册，手册中有各种物料的编号、规格、性能、材料、价格等，以便指导物料的选购。

2)根据工作需要，每月或每航次由大管轮填写物料申请单，经轮机长审查后，送船公司供应处审核并供应。

3)在国外购买物料，须事先经供应处批准。少量急用的物料，轮机长可在允许范围内决定购买。

4)应教育船员尽量节约物料开支。目前，我国许多船舶公司试行节约奖励办法，或物料费用分配包干措施等。

5)船舶物料应由专人负责保管，远洋船舶一般有一名轮助负责，沿海船舶由机匠长负责。

2 坞修工程

2.1 轮机主要坞修工程

坞修主要是对水线以下部件进行检查、清洁、除锈、油漆和修理，其主要项目有：

2.1.1 海底阀箱及海底阀的检修；
2.1.2 各出海阀的检修；
2.1.3 锅炉排污阀的检修；
2.1.4 螺旋桨的检修与测量；
2.1.5 尾轴管轴承及尾轴的检修与测量；
2.1.6 舵销与舵承的测量与检修。

2.2 坞修准备工作

2.2.1 坞修计划

坞修时间安排十分紧凑，必须事先做好各项准备工作，编制好坞修项目修理单，内容清楚准确，以便顺利完成各项坞修工程，不误坞期。修理单应提前报公司船技处审核、报价和选定坞修的厂家。

2.2.2 备件准备

为节省经费，船方应预先订购好坞修所需之重要配件。如需抽出螺旋桨轴检查，则必须备好密封装置的密封环和螺旋桨首端"O"形密封圈，否则会延误坞修期，或影响抽轴检查工程。

2.2.3 专用工具准备

为使坞修工作顺利进行，应事先准备好坞修所需的专用工具，如拆装螺旋桨螺帽的专用扳手、液压工具；拆装中间轴法兰螺栓的专用扳手；移动中间轴和螺旋桨轴的滑道滚轮；测量螺旋桨轴下沉量的专用测量工具等。

2.2.4 准备好有关图纸、资料

有关坞修的图纸、资料等应该齐备，如船体的坞墩布置图、螺旋桨图、螺旋桨轴及其轴承图、油、水舱布置图等；上次坞修的测量记录和检验报告等，都应由轮机长提供给船厂和验船师参考。

2.2.5 岸电、消防水、淡水和蒸汽的供应

进坞前，轮机长应与坞修主管工程师商妥有关坞修事宜，如岸电的供应、淡水供应、消防水供应、冷藏系统的使用、卫生设备的使用、冬季蒸汽的供应。临时追加项目的可能性等。

根据商洽结果，确定在坞中机舱必须保持运转的机械和船员生活安排。

2.2.6 污油处理

进坞前，应将船上保存的少量燃油集中调驳保管。如油舱内或油舱附近需要烧焊和其他明火作业时，必须将该油舱的油驳空，并经过洗舱和防爆安全检验。

2.3 坞修工程的验收

2.3.1 质量检查与验收

对坞修中的修理项目，应按修理单的要求检查修理质量，各海水阀研磨后，须经轮机员检查认可才能装复，安装螺旋桨和尾轴时，轮机长应在场监督进行。

更换海水管系、阀箱、冷却器等，应做水压试验。

2.3.2 测量记录的交验

坞修的测量记录（如尾轴下沉量、螺旋桨螺距测量、螺旋桨静平衡试验、尾轴承间隙、舵轴承间隙、轴系校中等）和其它年度检验的测量记录，应一式二份，提交给轮机长。

2.3.3 验船师的检验

主要坞修工程应申请验船师现场检验，并签署检验报告和有关船舶证书。

2.3.4 出坞时轮机长的检查工作

出坞前，轮机长应对下列修理工程仔细检查验收，认可后才能允许出坞。

1)检查海底阀箱的格栅是否装妥，箱中是否有被遗忘的工具、塑料布和垃圾等异物；所有海底阀和出海阀是否装妥。

2)检查螺旋桨、尾轴和舵是否装妥，螺旋桨的螺帽保护罩（导流帽）是否涂好水泥；尾轴管密封装置装妥后，应充油做油压试验，直至无漏油现象为止。

3)检查船底塞及各处锌板是否装妥。

4)坞内放水后检查各海水阀和管路。先使各阀处于关闭状态，观察海水有无漏入管内，然后分别开启各阀，对所有管路接头及拆修过的部位检查是否漏水，必要时拧紧连接螺栓。

5)坞内放水后，对海水系统充水放空气，使其充满海水。

6)冷却系统、燃油系统和滑油系统正常工作后，起动柴油发电机，自行供电后，切断岸电。

3 修船工作

3.1 船舶修理的种类和要求

中国船舶工业公司的舰船修理暂行条例规定，舰船的定期计划修理分为坞修、小修、中修和大修 4 类；交通部的有关修船制度规定，修船类别分为航修、小修、检修 3 种；而中国远洋运输总公司修船工作制度规定厂修类别分为航修、小修、检修和事故修理 4 种。

3.1.1 航修

航修属临时修理，不编计划。航修是为解决营运中发生的局部故障，影响航行安全，而船员不能自修的工程，可由船厂或航修站利用在港停泊作业时间进行，一般不影响营运。

3.1.2 小修

小修是为了解决营运中无法进行的工程，配合年度检验，交船厂施工，工程范围应尽可能缩小，保证安全营运到下次计划修理。

小修间隔期一般为 12～18 个月，如船舶技术状况较好，船体油漆性能允许，也可以延长到 24 个月。

3.1.3 检修

检修是修船的最大修别，每隔 2～3 次小修进行一次，配合特别检验进行。检修时除进行一般小修工程外，还应进行船舶主要部件的检查测量，修复小修时不能解决的缺陷，保持船舶强度，并结合以后的小修，保证主要设备能安全运转到下次检修。

3.1.4 事故修理

船舶发生事故后，应根据船舶损坏情况和检验部门提出的修理范围和要求，进行修理。如果通过临时性修理可以取得适航证书，可做临时修理，以减少营运损失。如损坏严重，则应根据当时当地的条件决定修理方案。事故修理如距计划修理时间较近可以考虑合并进行。重大事故的修理，公司应派代表监修。如事故牵涉索赔方面的问题，事故修理应与其他修理项目分别开账。

3.2 修船准备工作

3.2.1 修理单的编制

1)编制修理单的依据

编制修理项目，确定修理范围程度，主要依据以下情况：

(1)公司对该船编制的修船计划和修理类别；

(2)船舶证书上需要船级社检验的项目；

(3)说明书规定的各种设备和部件的检修间隔期；

(4)船舶在航行中的技术状况、磨损规律以及各种测试资料。

2)修理单的分类与编制

(1)船舶修理单分甲板、轮机、电气和坞修4个部分。

(2)轮机、电气、坞修的修理单由轮机员和电机员分别负责提出，由大管轮编制汇总，轮机长审定。

(3)修理单经轮机长和机务监督员审定后，书写一式三份，一份留船，两份上报船公司船技处。

(4)公司船技处对修理单审核批准后，送交有关船厂报价，选择修船厂。

3.2.2 备件和物料准备

1)在编制修理单的同时，根据修船项目的需要，应做好所需备件的订货工作，以便保证修船进度和节约修船费用，可在修理单上写明备件由船方提供。

2)需要船厂制造加工的配件与设备以及修船所需的大量材料和特殊材料，应提前向船厂说明，并在修理单上写明这些配件和材料由厂方提供。

3)对于修船中使用的工具、物料以及自修项目的备件也应有计划地分期申请领取。

3.3 修船组织工作

3.3.1 安全工作

1)船舶修理期间的安全工作，由船方、船厂双方结合实际情况签订协议书，共同做好安全工作。

2)施工过程中，双方都要严格履行开工前商定的安全协议，遵守双方的防火等安全规定。本船修理时施工区域的防火安全，以厂方为主负责，船方应给予密切配合。

3)为了配合船厂做好施工安全工作，机舱应派船员看火，专门负责防火安全和施工现场的安全。

4)修船中万一发生意外事故时，船员要坚守岗位，首先保卫好本船的安全，然后服从船厂统一指挥，共同保护或抢救生命和财产。

3.3.2 自修工作

船员自修工作对摸清技术情况，及时消除隐患、节约修理费用、缩短修理期、延长船舶寿命、提高船员技能和保证船舶安全都有重要作用。船员自修可分为营运期间的自修和厂修期间的自修两种。

1)船舶营运期间，船员在完成预防检修计划的前提下，可以自修属于厂修范围的工程，一般不占用营运时间，但对运输任务繁忙、停泊时间短或船舶定员偏少的船舶，可由公司给予一定的停航检修时间，必要时可申请船厂、航修站给予协助。

2)船舶厂修期间，船员应尽可能多做一些属于厂修范围的自修工程，进厂前应在编制修船计划的同时，编制自修计划，由船公司批准后执行。

3)船员自修应该充分利用船上现有的设备和工具。船公司机务和供应部门要有计划地给船舶配备必要的电动、风动和小型机械化工具。

4)自修所必需的备品配件和物料，各主管部门要给予优先安排，及时供应。

5)船舶进厂时，船员要基本固定，必须调动时，要征得船公司机务部门的同意，以保持自修力量。

3.3.3 监修工作

1)监修人员

船舶所属的上级机关应指派船舶监修师进行监修，并代表甲方制订和签署文件。不指派专人监修时，应由船长、轮机长、大副负责监修。

2)对修理工程的进度、材料、工艺和测量数据等，轮机员应进行监修，如有不妥，应及时向厂方提出意见。

3)本船修理项目中须提交船级社检验的项目，由船方申请检验。

4)单项工程修理完工或试验合格后，由轮机长检查认可。

5)全部修理工程竣工后（海上试验或码头试验结束后），由双方代表签署本船《完工验收单》作为交船的依据。

6)试验、试航和工程验收根据甲乙双方事先商定的内容和船检局的标准进行。如在试验和试航中，船级社及船方提出属于船厂修理工程中的缺陷和遗漏，船厂应及时消除和完成，如不属于船厂修理工程范围，而又需船厂修理时，则按附加工程办理。

7)船厂应对承修工程的质量完全负责。固定部件保修期为 3 个月，运动部件为 6 个月。

8)在保修期间，如属船厂的质量问题，由船厂及时免费修复；如因该船在其它港口，船厂不便前往修理时，船方可将船厂应负责的项目修好，然后将账单交船厂审核，并由船厂支付修理费用。如双方对遇到的问题发生分歧，应在听取船级社意见后协商解决。

3.4 试航与试验

为了保证制造与修理质量，监修人（监造人）应要求厂方做好各项试验和试航工作。

船舶柴油机和主要设备的试验，船级社规定必须经 5 个阶段的试验，即重要部件的材料试验、部件检查、出厂试验、系泊试验和航行试验。

严重损坏的柴油机，经更换重要部件，并经过修复性修理后，也需要做系泊试验和航行试验，甚至五项试验，以保证船舶的航行安全。

3.4.1 重要部件的材料试验

重要部件的材料必须经过材料成分分析和机械性能试验，以保证工作可靠性。需要进行材料试验的部件有下列各项：

1)气缸盖；

2)机座；

3)主轴承横梁；

4)气缸衬；

5)曲轴；

6)活塞顶；

7)活塞杆;

8)连杆;

9)十字头;

10)连杆螺栓;

11)凸轮;

12)高压燃油管;

13)起动空气管;

14)增压器转子;

15)涡轮叶片。

3.4.2 部件检查

重要部件在装配之后，应根据其工作条件进行水压试验、表面检查、平台找正、间隙测量等，其中主要的有:

1)机座水压试验;

2)活塞水压试验;

3)缸套水压试验;

4)喷油器冷却水侧压力试验;

5)燃油泵试验与调整;

6)气缸安全阀压力试验;

7)起动阀压力试验;

8)曲轴检验;

9)曲轴拐档差测量;

10)十字头导板间隙测量;

11)贯穿螺栓上紧负荷和伸长度;

12)增压器转子动平衡试验;

3.4.3 柴油机出厂座台试验。

1)起动试验 冷态正倒车连续交替起动各6次，记录空气瓶每次起动的空气压力数值，检验柴油机的起动是否迅速、灵活和可靠。

2)换向试验 柴油机在最低稳定转速下进行换向试验，从换向操纵开始到柴油机已在相反方向工作开始供燃油为止，其换向时间应不超过15秒。

3)最低稳定转速试验 柴油机稍带负荷缓慢降低转速，测定柴油机最低稳定工作转速，运行15分钟，记录最低稳定工作转速和其它运转参数。

4)超速试验 柴油机空负荷或稍带负荷（为使转速稳定）缓慢增加转速直至超速。测定超速限制装置是否起作用，并测出切断燃油供给、迫使柴油机停车时的超转速。该转速不应超过额定转速的115%。

5)低压安全切断装置试验 柴油机以最低稳定转速运转，分别逐渐调低气缸冷却水、活塞冷却水和主轴承滑油的压力，记录低压安全切断装置切断燃油供给时的压力。

6)推进特性试验 推进特性试验的负荷和时间，见表1.3.1-14，记录各负荷时的主要参数，测示功图和耗油率，绘制推进特性主要参数的曲线。

表 1.3.1-14　　推进特性试验表

负　荷	25%	50%	75%	90%	100%	110%
运转小时	1	1	1	1	4	0.5

额定功率运转试验是连续性的，如在运转试验过程中，柴油机发生不良现象须停车修理时，则额定功率运转试验应按验船师规定重新试验。

7)调速性能试验　柴油机功率由100%负荷突卸至 0 负荷，记录柴油机转速的变化，最高转速不应超过额定转速的 115%。

8)停增压器试验　将其中一台增压器用盲板封死后，柴油机从低负荷起，按推进特性逐渐增加负荷，以柴油机的排烟温度和爆发压力均不超过正常规定数值为限。记录工作参数和输出最大功率值，并运转 15 min。

9)减缸试验　任选一缸停止工作，柴油机从低负荷起，按推进特性逐渐增加负荷，以柴油机排烟温度、爆发压力均不超过正常规定数值为限，缓慢增加负荷时不能有剧烈振动。记录工作参数和输出的最大功率值，并运转 15 分钟。

10)倒车试验　柴油机在空负荷的情况下，倒车转速为额定转速的 90%左右，运转 15 min。

11)试验后的拆检　座台试验后，任选一缸拆开检查，并记录情况。

3.4.4　系泊试验

船舶在建造完毕或修理结束后，为了确保船舶具备出海试验的条件，必须对船舶动力装置在验船师监督下进行一次安装质量、修理质量和工作性能的试验。如在系泊试验过程中发现有不正常现象，应由船厂重新修复后再做系泊试验。

1)发电机并电试验;

2)锅炉供汽试验;

3)主机试验;

4)舵机试验;

5)锚机试验。

3.4.5　航行试验

海上航行试验对轮机部分来说，是为了进一步保证船舶动力装置各系统的安装修理质量、运转的稳定性和可靠性，测试有效功率及经济性能等，并验证各项试验结果是否符合规范要求，以保证船舶航行安全。

1)主机的试验

(1)柴油机轴系扭振试验，实测主机的扭振临界转速，验证扭振计算，并确定主机的转速禁区;

(2)推进特性试验:

正车　80% n_H　连续运转 0.5 h

正车　90% n_H　连续运转 1 h

正车　100% n_H　连续运转 4 h

正车　103% n_H　连续运转 0.25 h

倒车　85% n_H　连续运转 0.25 h

（3）最低稳定转速试验；
（4）紧急倒车试验；
（5）船速试验；
（6）调速器试验；
（7）造淡水试验；
（8）减缸试验；
（9）停增压器试验。
2)其它试验
（1）舵机试验；
（2）锚机试验；
（3）起货机试验；
（4）泵的自动交换试验；
（5）锅炉蒸汽量测定及安全阀试验；
（6）遥控设备试验。

4　技术文件管理

4.1　文件分类

4.1.1　轮机部技术档案包括下列文件：
1)设备证书（包括制造厂的保证书）；
2)规章制度（包括本船自订的规章制度）；
3)函件（包括通知、指示）、电报（包括发报底稿和来报复制件）；
4)各类修船计划；
5)总结、航次报告、其它报告；
6)备件、属具、材、物料等的计划、申领单、报销单据、发票等；
7)修理单；
8)轮机日志；
9)轮机部检修记录簿。
4.1.2　轮机部技术资料包括下列文件：
1)船舶资料簿、各种技术图纸和设备说明书；
2)验船师检验报告；
3)试验报告；
4)化验报告；

4.2　业务报表

按要求向公司提交的轮机业务报表有下列各项：
1)船舶预防检修计划表；
2)船舶轮机部航次工况报告；
3)轮机部航次维修工作报告；

4)航次检修保养计划表;
5)船舶电气设备预防检修计划;
6)船舶电气设备航次检修工作报告;
7)船舶电气设备航次总结报告;
8)主、辅机开档测量记录;
9)船舶轮机部热工报告;
10)炉水试验及处理报告表;
11)冷却水处理记录;
12)船舶机损、污染事故报告;
13)轮机高级船员交接报告书;
14)轮机长考核报告表;
15)轮机(电机、冷藏)员考核报告表;
16)船舶主要设备运行时间统计表;
17)修船报告。

4.3 文件保管

4.3.1 船公司主管部门应监督、指导各船轮机部做好档案和技术资料的保管工作。
4.3.2 档案和技术资料均应编号并记载在清册和清单中。轮机长应定期清点,如发现遗失,立即书面报告公司,并设法补齐。
4.3.3 轮机长应领导所属船员做好各种机件的测量和检修记录,并负责核对,以保证技术资料的正确性。
4.3.4 文件保管由轮机长总负责,除亲自保管大部分文件外,部分技术资料可分发给主管轮机员和电机员保管。
4.3.5 档案资料均由轮机长亲自保管,一般不得外借。
4.3.6 验船师检验报告、技术图纸和各种设备说明书等由轮机长负责保管,编制清单。轮机部人员借阅时应进行登记。
4.3.7 文件保管人离职时,应根据清单向接替人逐件点交。
4.3.8 文件已存船 5 年之后,如无需要,可送公司主管部门保存。

5 船舶证书管理

5.1 证书期限

船级社签发的各种证书必须妥善保管,特别注意其有效期限。证书期满时,如船舶不在登记国港口,主管机构可将届将期满的证书展期,展期期限仅以抵达登记港的航次为限,原则上只有在正当合理的情况下才能予以展期。证书展期的期限一律不得超过 5 个月。未经展期的证书,主管机构从证书期满日起,给予至多 1 个月的宽限期限。

船舶如要保持登记的船级,必须按规定,定期履行下列检验;

5.1.1 年度检验

年度检验每年一次。按船级证书中入级检验或特别检验签证日期,每周年前后 3 个月内

进行一次年度检验。

5.1.2 坞内检验

间隔时间，客船一般不超过一年，其它船舶一般不超过两年。

5.1.3 特别检验

特别检验一般每隔4年一次。检验日期自建造入级检验或前一次特别检验完毕之日起。特别检验不能按期进行，延长日期最多不超过12个月。

5.1.4 螺旋桨轴和尾轴检验

1)装有连续衬套或认可的油封装置或用认可的耐腐蚀材料制成的轴，其检验周期为：

（1）轴上开有普通键槽者，对单螺旋桨船每3年一次，对双或多螺旋桨船每4年一次；

（2）轴上开有雪橇形或匙形键槽，且键槽根部有适当的圆角，轴表面上的键槽锐边已清除者，对单螺旋桨船每4年一次，对双或多螺旋桨船每5年一次；

（3）轴的后端为法兰连接或轴与螺旋桨为无键连接者，每5年一次。

2)除本条1) 以外的其它轴，每2年一次。

5.1.5 锅炉检验

1)主水管锅炉每2年一次。

2)主火管锅炉，炉龄在8年以内每2年一次，炉龄在8年以上每年一次。

3)各种辅助锅炉包括废气锅炉，炉龄在8年以内每2年一次，炉龄在8年以上每年一次。如果辅助锅炉是水管锅炉，可以考虑在8年以后仍按每2年检验一次。

5.1.6 循环检验

循环检验的周期为5年，每年约有1/5左右的项目安排检验。

5.2 申请检验

船级是一种世界性评定船舶技术状况的通用形式。船级可以区别船舶的技术状况；船级可促使船舶质量的提高，减少海损事故，保证海上安全运输；取得好的船级，船舶和货物的保险易于为保险公司接受；有利于出租和承租。

船舶所有人必须向验船机构提出申请检验。对新建造的船舶，在提出入级检验申请时，应将图纸、资料一式三份提交验船部门审查，并在验船师监督下进行建造。根据不同的检验范围和规范要求，验船机构授予不同的入级符号。营运中的船舶欲保持船级，必须由验船部门定期检验船舶状态，如不按规定期限检验，船舶将失去船级。对营运中的船舶来说可申请下列几种性质的检验。

5.2.1 初次入级检验

用于不在船级社检验下建造的船舶。检验后准予入级的船舶，将和船级社检验下建造的船舶一样对待。

申请初次入级时，应提交该船在建造和改建中的有关资料和文件，其它验船机构签发的证书和检验文件。

5.2.2 保持入级检验

1)船舶在下列情况将失去船级：

（1）船舶因耽误了定期检验，使证件过期或缺少证件。

（2）在发生海损事故后，没有判明损坏的性质和修复之前。

（3）没有经过船级社认可，进行了改装，改变了原有结构。

(4)船舶技术状况和装置性能恶化、不适航。

2)为保持入级，船舶已获得的轮机级，轮机长应按5.1条所列的期限，提前一个月报告船长，由船长向验船机构申请检验。

5.3 循环检验

为了缩短船舶停航待检的时间，提高船舶营运效率，根据船舶所有人及其代理人的申请，并经验船机构同意，其特别检验可用循环检验代替。

实行循环检验的船舶，由验船机构发给循环检验卡。每卡一式三份，分别存放在船上、船舶所有人和验船机构处。存放在船上的船体和轮机循环卡分别由船长和轮机长保存。

5.3.1 循环检验的项目

循环检验的项目应按特别检验规定的项目进行，它不包括公约规定的各种检验，亦不能取消或改变船级规定的其它各项检验，如年度检验、坞内检验、锅炉检验、螺旋桨轴和尾轴的检验等。

5.3.2 循环检验的签署

实行循环检验的船舶，当验船师登船检验时，应出示循环检验卡，对安排的部分项目进行审查和签署。

在没有设立验船部门的港口或在海上，对经验船部门同意的某些项目，可由船检局授权的轮机长代理进行检验。

5.3.3 轮机长受权进行循环检验的条件

1)受权人必须由船舶所有人推荐，应认为其具有一定的资历、技术水平以及办事公正、认真、可以担任代理检验工作。

2)受权检验人应持有我国当局颁发的正式的轮机长证书或外国当局发给的等效证书。

3)一般情况下，受权检验人至少应在该船公司持有上述证书3年以上，并在同类型船舶上工作过一年以上。

4)受权检验人应熟悉船级社循环检验的各项规定和要求。

5.3.4 受权的轮机长可以代理进行循环检验的项目：

1)主机气缸盖及其附件；

2)主机气缸套；

3)主机活塞、活塞杆；

4)主机连杆、十字头销、轴承和导板；

5)主机高压油泵、燃油增压泵；

6)主机减振器；

7)主机扫气泵、增压器（仅有一只的除外）；

8)主机驱动的舱底水泵、润滑油泵、冷却水泵；

9)独立的舱底水泵、压载泵、消防泵、淡水冷却泵、总用泵、海水循环泵、润滑油泵、油头冷却泵、燃油驳运泵等；

10)冷却器（每类冷却器只有一个的除外）；

11)低压加热器；

12)空气压缩机；

13)锚机；

14）机舱的鼓风机和抽风机；

15）辅柴油机及其驱动的泵。

6 污水排放

6.1 船舶防污染的公约和规则

6.1.1 1973年“国际防止船舶造成污染公约”

该公约适用于各种类型的船舶。公约要求港口设有足够的接收污水设施，400总吨和400总吨以上的船舶要装有高效能的油水分离器，油轮要设置排油监控和记录装置，载重量7万吨以上的油轮应设专用压载舱。公约对油类及有毒液体的排放标准作了新的规定。

6.1.2 1978年海协通过的“油轮安全和防止船舶造成污染议定书”

议定书对油轮的检查、发证、专用压载舱的设置提出了更严格的规定；对原油洗舱，清洁压载舱等提出了新的规定。

6.1.3 1982年颁发的“中华人民共和国海洋环境保护法”和1983年颁发的“中华人民共和国海洋石油勘探开发环境保护管理条例”

6.1.4 许多海运国家为其领海制订的防止船舶造成污染的法规

6.2 “船舶防污染规则”

为了执行上述国际公约和各国与港口的防污染规定与法令，防止海洋环境被污染，中远总公司和海运局制定的相应规则，主要强调以下各点：

1）各船应制定本船的防污染实施细则和必要的操作规程并切实遵照执行。

2）每个驾驶员和轮机员都应熟悉国际防污染公约的有关规定。为防止污染事件发生，船舶将要驶近和已经驶离禁止排污水域时，船长应及时通知轮机长；在禁排水域航行时，船长还应将有关防污染的指示写入“船长航行指示簿”，值班驾驶员应认真执行，并将船舶在禁排区的动态及时通知值班轮机员。

3）轮机长应妥善安排机舱排放污油、水工作，并经常与船长密切联系；值班机工排放污油、水时，须征得值班轮机员的同意，如值班轮机员不能确定，应请示轮机长。

4）船上的排油监控装置、油水分离设备和其它滤油装置均应经常处于正常使用状态，注意检查养护，发现故障和不正常时，应即设法修复。轮机长应经常指导和督促有关人员正确熟练地使用上述设备。

5）添装燃油及其它各项油类操作时，须先落实安全予防措施，防止跑、冒、漏、渗等事件的发生。

6）“油类记录簿”是记录各项油类操作和排污的重要文件，是处理污染事件的法律依据，应认真填写、保管和签署“油类记录簿”。

6.3 污水的排放标准

公约对400总吨和400总吨以上非油轮污水和油轮机舱污水和油船的压载水都规定了排放标准（见本手册第7卷），对排放的区域，水中含油量、排放方式等都应严格遵照公约和规定执行，否则船舶所有人和操作者将被处以罚款。

6.4 船用油水分离器、粪便处理装置和焚烧炉的管理、使用

6.4.1 船用油水分离器

舱底水泵先将机舱污水从污水井泵入污水舱柜，然后再经油水分离器进行分离处理。分离出的污水排出舷外，分离出的污油流入污油柜或经焚烧炉燃烧。船员要细心操作，避免将超过排放标准的污水排出舷外，保持油水分离器处于正常状态，以备到港后接受安全检查。

6.4.2 粪便处理装置

停港期间，船上的生活污水和粪便应储存在蓄污装置内，经消毒和粉碎后可在距最近陆地 4 海里以外的水域排放入海，否则应在 12 海里以外的水域排放。不论何种情况，不得将蓄污装置内的污水和粪便倾刻排光，而应于船舶以不少于 4 节的航速的航行途中，以中等速率进行排放。如无蓄污装置，则应严格遵守港口的规定，采取临时的防污措施。

6.4.3 焚烧炉

焚烧炉是处理污油、粪便和固体杂质的装置。在下列情况下会发出故障报警：

1)焚烧炉里燃烧温度过高；

2)电动机的过热保护装置动作；

3)焚烧炉里火焰熄灭；

4)进入焚烧炉的粪便温度过低；

5)泵入焚烧炉的粪便压力过低；

6)粪便柜里液位低。

7 油料管理

7.1 燃、润油的加装、驳运和储存

7.1.1 船舶油料储备量的规定

1)消耗量　根据船舶抵达加油港前,预计设备运转的时间和功率,进行估算得出的需要量。

2)备用油量　根据季节、航程和航途的风浪规律来考虑和确定备用油量，一般为主机全速运转 3 ~ 5 昼夜所需的消耗量。

3)残油量　是指油舱油柜内的存油在正常工作情况下无法取用的部分，一般称“死油”。

4)换油一次需要量　是指系统中的滑油一次全部换新的需要量。有两个主机循环油柜的船舶，其中一个循环柜的存油应认为是储备油。

5)燃油最低储备量　是主机、锅炉、发电机的燃油消耗量、备用油量和残油量之和。

6)主机气缸油最低储备量　是气缸油的消耗量、备用油量和残油量之和。

7)机油最低储备量　主机、发电柴油机机油的消耗量、备用油量（换油一次需要量）和残油量之和。

8)其它润滑油及液压油的最低储备量　必须满足设备消耗所需，其储备油量根据船舶实际情况，自行掌握。

7.1.2 燃、润油耗存量的测量和计算

1)燃、润油耗存量的测量和计算由各主管轮机员负责。

2）主机燃、润油和辅机、锅炉燃油的消耗量应每日测量和计算。

3）辅机机油，其它润滑油和液压油的消耗量应单航次测量和计算一次。

4）燃油的储存量应在每次进港和离港前分别测量和计算一次。两港之间如航程较长，还应在中途测量和计算。

5）主、辅机机油和液压设备用油的储存量应在每次到港前测量和计算一次。如两港之间航程较长，还应在中途测量和计算。

6）其它润滑油的储存量应按每单航次测量和计算一次。

7）燃、润油的测量可以通过流量计、量油尺、油位表等多种方法进行。使用流量计时，应同时注意泵输出流量计和机器回油流量计。实际耗油量应是两个流量计测量结果的差值。在使用量油尺和油位表测量计算时，应注意船舶纵、横倾的影响，并进行相应的修正。

7.1.3 燃、润油耗存量的申报

1）航行中机舱正午报告中应填写自昨天正午至今天正午的实际燃油消耗量。

2）抵港前，轮机长应向船长报告燃油存量，必要时还应报告各种润滑油和液压油的存量。

3）离港前，轮机长应向船长报告燃油存量，开船后，船长应将船存燃油量电告船公司。

4）每年年底，轮机长应将12月31日正午时的燃油实际存量报船长电告船公司。

5）航次结束后，二管轮应根据各主管轮机员测量和计算的结果，填写油料耗存航次报告表，经轮机长审核签署后报船公司。

6）报告表中的燃润油耗存量，应与轮机日志的记载一致，并与实际数基本相符，抵港后，应再核对，如实际存量多于轮机日志中数字3%，或者少于该数字时，轮机日志的记载数字应予改正。

7.1.4 燃、润油添装计划

1）轮机长应根据航次任务检查各种燃、润油的储量是否足够，如需添装，应与船长共同拟出添装计划。

2）拟订燃、润油添装计划时，应考虑到本航次装卸货的地点和数量，设备的需要油量，燃油供应公司与我方的合同，油价等各方面的因素，或一次添装，或沿途分次添装。但应尽量利用装卸港添装，避免或减少专门挂靠。

3）船长应将燃、润油添装计划及时上报船公司主管部门；主管部门应及时复告船舶对计划的批准或修改。

4）按照船公司批准的添装计划，船长应在抵达加油港前，按该港规定提前数天（一般为3天）电告代理行。船舶应经常注意船公司或供油商的有关通知，并予遵守。

5）电告内容应包括需添装燃、润油的牌号、规格和数量。数量一定要准确，防止因装不下而退油造成经济上的损失。

7.1.5 装油前的准备

1）二管轮负责测量各油舱的存油量；抽空溢油柜的存油。

2）轮机长应和大副商定落实添装的油舱及其添加量，以配合装货和水尺调整。

3）主管添装的轮机员负责检查，并打开受油舱柜的甲板透气管活瓣，并在透气管口下方放置盛油器皿和备妥一定数量的木屑、棉纱，以备必要时用以揩抹。

4）木匠负责堵塞甲板流水孔。

5）在本船靠妥加油码头或油驳靠妥本船即将开始装油前，应在油气可能扩散到的区域悬挂“禁止吸烟”的警告牌，并禁止明火作业，还应根据港口规定，悬挂“B”和“慢车”信号旗。

6）装油开始前，轮机长亲自或指派主管轮机员与供油代表一起测量供油油驳或油罐车的

存油量。如有流量计的，则应核对流量计的读数；如是油罐车，则应检查铅封。

7)供油方来接装软管时，要监督和检查其接装是否紧密牢固，以防渗漏。

8)轮机长率同二管轮应与装油代表联系商定下列事项：

（1）油的品种、数量是否符合我方要求；

（2）各种油的装油次序；

（3）最大泵油速度；

（4）装油过程中的双方联系方法。

7.1.6 装油过程中的工作

1)装油时，应增派值班人员，以便及时发现和处理装油过程中发生的问题。

2)检查燃油管系各阀开关是否正确，检查完毕后，即可通知供方泵油。

3)开始加油后，应检查另一舷的注入口法兰盖板是否漏油。

4)开始加油后数分钟，应即测量受油舱柜，检查透气管的透气情况，倾听装油管的声音，以证实油已正确装入指定舱柜。

5)在装油过程中测量检查要勤快，注意装油引起船舶倾斜的影响，防止溢油，首先封住透气管，以免发生跑油现象，必要时要求供方调整泵油速度。

6)当受油舱柜的油位已达本柜高度的3/4时，应打开下一个受油舱的进口阀若干圈。受油舱柜的油位高度应控制在离顶板至少15 cm。

7)转换装油舱时，应先敞开下一个装油舱的进口阀，然后关闭正在装油的受油舱进口阀。

8)在寒冷天气装油时，应适当加温，防止油装入后温度下降，影响流动性和测量，甚至造成跑油。

9)采集油样是否符合要求。

10)最后用气体对加油管清洗，扫线时应注意冒油。

11)抽吸桶装润滑油时，应监督供方尽可能抽空。

7.1.7 装后验收签字

1)加油结束后，轮机长应亲自或指派主管轮机员与供方代表一起测量油驳的存油量或核对流量计读数。测量和计算本船受油量，应按加油后船的吃水差计算。

2)船方受油量一般以供方的计算为准，但应在允许误差范围之内。

3)装油过程中所采集的油样密封后，轮机长与供方代表在油样卡片上签字，瓶装油样应妥善保管于船上。

4)核实加油数量和时间后，轮机长在加油收据上签字。如有争议，可在收据上批注实际受油量，同时书面报告船公司。

5)加装润滑油和燃油，轮机长还需在海关申报表上签字。

7.1.8 燃油的驳运与储存

1)在驳运和储存时，尽量避免不同品种和不同加油港的燃油掺混，以防止燃油变质。

2)各油舱之间的相互调驳，要注意保持船舶平衡。

3)对不同燃油和舱柜，选择最佳的加热温度范围，防止加热温度过高。

4)驳油时要正确开关各阀，并防止溢油。

7.2 燃油的选用和化验

7.2.1 船用燃油的种类与选用

1)国际上各油公司习惯上将船用燃油分为下列几种，如表1.3.1-15所示

表1.3.1-15　　船用燃油种类

序号	名称	英文名称	简称
1	轻柴油	Gas Oil	GO
		Marine Gas Oil	MGO
2	船用柴油	Marine Diesel Oil	MDO
3	中间燃料油	Intermediate Fuel Oil	IFO, IF
4	船用燃料油	Marine Fuel Oil	MFO

2)主要燃油规格对照表（表1-3-1-16)。

3)根据燃油的低温性能选用燃油。

(1)柴油的低温性能有凝点、倾点、冷滤点和浊点。

(2)高速小型柴油机，如应急发电柴油机、应急救火泵柴油机、救生艇发动机等选用轻柴油时主要考虑凝点这项指标。即根据机器工作时的环境温度选用轻柴油，夏天用10号或0号，冬天则根据最低气温选用－10号、－20号、－35号等。

(3)没有完善的燃油加温设备、过滤设备的柴油机也必须根据季节和航线情况选用凝点较低的轻柴油。

4)根据燃油的密度选用燃油。

密度大的燃油往往含有较多的杂质和水分，所以选用密度大的燃油必须有完善的净油设备。带比重环的离心分油机能够净化的最高密度为0.991 kg/L（15℃），对密度在0.991～1.013 kg/L（15℃）的燃油可采用不带调节环（比重环）的ALCAP型分油机或连续排放型的分油机。

5)根据燃油的粘度选用燃油

船舶大量使用的燃料油是轻柴油和渣油按不同比例混合而成的，燃料油的粘度越大说明所含的渣油成分越多，燃油质量越差。燃料油粘度和成分的关系如图1.3.1-3所示。由图可知1500秒的燃料油是由12%轻柴油和88%的渣油掺混而成。

7.2.2 燃油的化验

在船上，对燃油一般是不进行化验的，但是目前燃油质量越来越差，使用中问题时有发生，所以对燃油化验也普遍引起重视，许多船舶公司和化学公司推出了简易的化验设备，可在船上化验燃油的水分、倾点、粘度、密度、盐分、不容性等。

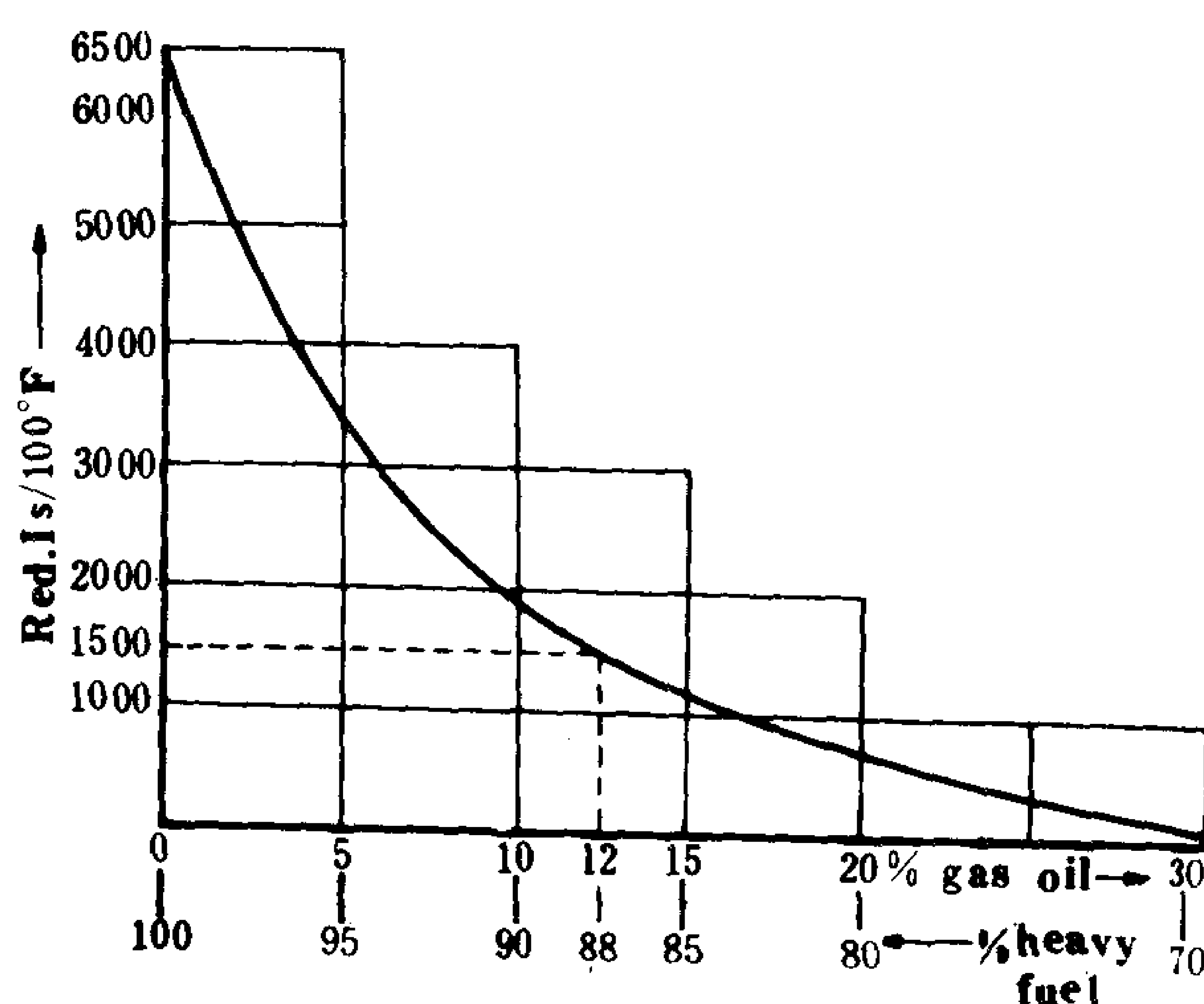


图1.3.1-3　燃料油粘度与成分关系

1)水分化验

新添装的燃油有时含水分较多，用验水膏发现水分之后，可取油样做水分化验，并将化验结果报告公司，若水分超过允许值，可通过代理行要求油公司赔偿损失。

燃油燃烧前如含有水分，不仅能量

表 1.3.1-16

燃油规格对照表

国际内燃机会议牌号（CIMAC）	CIMAC 1	CIMAC 2	CIMAC 3	CIMAC 4	CIMAC 5	CIMAC 6	CIMAC 7	CIMAC 8_A	CIMAC 8	CIMAC 9	CIMAC 10	CIMAC 11	CIMAC 12	CIMAC 13
国际标准组织牌号（Draft ISO-F.）	DMC	RMC10	RMB10	RMA10	RMD15	RME25	RMF25	RMG35	RMH35	RMK35	RMH45	RMK45	RMH55	
英国标准规范牌号（BS MA1001982）	M_3	M_4		—	M_5	—	M_6	—	M_7	—	M_8	—	M_9	—
米制系统的粘度等级（SI）	30	40		60	80	100 120	150 180	240 280	320 380		420 460			
日本燃料油规格 JIS K2205-1960	A重油	B重油			C 重油									
我国重柴油 GB445-77	30 号													
美国 ASTM D396-73	4—D	No5 轻		No5 重		No6								
粘度 40℃ 100℃ 50℃ 100°F	单位 cst cst cst Red I sec	极限 max max max max	14 80	10 40 300		15 80 600	25 180 1500		35 380 3500		45 500 5000		55 700 7000	
密度 15℃	kg/L	max	0.920	0.991		0.975	0.991	0.991	0.991	1.010	0.991	1.010	0.991	1.010
闪点	℃	min	60	60		60	60		60		60		60	
残碳 Ramsbotton Conradson	% (m/m)	max	2.5	14	10	14	15	20	18	22	22		22	
灰分	% (m/m)	max	0.05	0.10		0.10	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20		0.20	
水分	% (v/v)	max	0.30	0.50		0.80	1.0		1.0		1.0		1.0	
硫分	% (m/m)	max	2.0	3.5		4.0	5.0		5.0		5.0		5.0	
钠	mg/kg	max	100	300	150	350	200	500	300	600	600		600	
铝	mg/kg	max	30	30		30	30		30		30		30	

有所损失，而且增加后燃和沉积物，引起燃烧性能恶化。

2)密度测定

确切地知道燃油的密度，对计算油舱的储油量、计算燃油的体积热量和正确选用分油机比重环都是十分重要的。

密度大的燃油，其粘度、残炭、胶质和沥青质的数值相应较高，因此密度可以作为评价油品性能的间接指标。

利用船上的化验箱，或给油公司送油样，及时化验燃油密度，对燃油管理十分必要。

3)不容性试验

不同产地和油公司的燃油混合后，其性质不相容而形成油污，影响燃油的分离、过滤、雾化和燃烧，因此加油时，应做混合试验。混合指数为 1 ～ 5， 1 为掺混性能良好， 5 为不容性最差， 3 以上则说明不能掺混，如果掺混则形成油泥，致使分油机和滤器堵塞，雾化不良，燃烧不完全，冒黑烟，功率下降以及气缸磨损加剧。

7.3 润滑油的管理和化验

7.3.1 不同机械和不同润滑部位选用的滑油也不同，所以必须严格按照滑油表使用滑油。

7.3.2 不同的润滑油，其添加剂各不相同，要避免两种滑油混合使用，以防引起化学反应而生成沉淀，或两种不同性质的胶体混合后发生共同凝聚现象。必须混合使用时，应经过混合试验来证实是否能够混合。

7.3.3 对有添加剂的滑油不宜进行水洗，以免某些添加剂溶于水而流失或与水发生作用导致不良后果，影响油品质量。

7.3.4 保持曲柄箱滑油的最佳液位。液位过高会发生漏泄、液击和风浪中溢油；液位过低会加速滑油变质。

7.3.5 经常分离滑油，将泥渣、机械杂质和水分及时排出。

7.3.6 船舶应按船公司批准的润滑油牌号、规格来使用和添装，如要更换应报船公司批准。

7.3.7 机油变质报废时，必须报告船公司批准。

7.3.8 润滑油定期化验规则

1)主机润滑油由大管轮负责按规定定期取样化验；副机润滑油由二管轮根据具体情况和需要，经轮机长批准更换或送样化验；其它机械应经常检查润滑油的质量，酌情更换；液压系统用油可根据具体情况和油的质量送样化验。

2)柴油主机润滑油一般应 3 ～ 4 月取样化验一次。

3)油样应能代表正常运行时润滑油的情况，一般在主机出口或滑油分油机前取样一瓶(约 500 毫升)。

4)油样应妥善密封，瓶上标签应写明：船名、公司、机型、滑油牌号、燃油牌号、运转时间、取样日期、送验港口等。

5)使用国外滑油，在国外可经代理行转送该油公司免费化验；使用国产滑油，油样应送船公司化验，特殊情况下可在国外化验。

6)公司应尽快将化验结果告船。船上应建立滑油记录簿。

8　自动化机舱的管理

8.1　自动化机舱分类

8.1.1　驾驶室及主控制站遥控，主控制站有一人值班的机舱

ZC 的入级附加符号为 AUT-1，指能由驾驶室辅控制站遥控操纵的轮机装置，机舱主控制站须有一人值班。其主机包括重要辅机、可调螺距螺旋桨、发电机组、锅炉及其辅助设备、燃油驳运贮存系统、空气压缩机等应设有控制、监测、报警和安全系统。

8.1.2　集中控制机舱

ZC 的入级附加符号为 MCC，指能由机舱集控室进行操纵和监视机械运转的轮机装置。集中控制站对机电设备运行的控制和监视应该与直接控制和监视一样有效。

8.1.3　组合推进装置驾驶室控制

ZC 的入级附加符号为 MIP，指推进机械和重要辅助机械组合成一个动力机组并由驾驶室进行遥控的轮机装置。此种遥控系统在实行驾驶室控制时，机舱内一般要配备值班人员进行值班监视。

8.1.4　周期无人机舱

ZC 的入级附加符号为 AUT-O，指能以周期性无人机舱进行操纵的轮机装置。由驾驶室辅控制站遥控或机舱主控制站均可控制，且在驾驶室遥控时，机舱的主控制站可在预定的时间内不需值班人员进行监视。

8.1.5　主要船级社的无人机舱船级符号

无人机舱的船级符号，各主要船级社规定如下：

中国船级社（ZC）：　AUT-O

英国劳埃德船级社（LR）：　UMS

日本海事协会〔NK（K）〕：　MO

挪威船级社（NV）：　EO

美国船舶局〔AB（S）〕：　ACCU

联邦德国劳埃德船级社（GL）：　Aut-h/24

苏联船舶登记局（PC）：　A1

8.2　自动化机舱管理要点

8.2.1　对气动控制系统要注意空气管路的漏泄，漏泄部位有时较难发现。

8.2.2　控制空气中含有的油分、水分可能导致控制故障的出现，所以空气的除湿设备和过滤设备应保持正常工作。

8.2.3　经常清洗空气滤器，防止铁锈等杂质进入气动仪表。

8.2.4　注意液压油的过滤净化，保持液压油的清洁和温度。

8.2.5　加强对继电器的检查，继电器温度过高时应注意检查和及时更换。

8.2.6　加强对电子电路的功能检查，备有必要的插板备件。

8.2.7　定期进行仪表的校验。

8.2.8　定期试验自动——手动转换操作，防止手动机构卡住。

8.2.9 加强对船员的技术培训。

8.3 对自动化设备的要求

8.3.1 自动化系统的电气和电子设备应适应船舶的正常环境条件，如不受盐雾、湿度、油雾和霉菌等的影响。

8.3.2 所有自动化系统的各种设备，应在下列环境条件下正常工作：

1)环境温度 机舱及主控制站：0～+55℃。驾驶室辅控制站及室内：-10～+55℃

安装在有发热部件的柜（箱、台）内的电子设备，在工作过程中，应能承受最高温度+70℃，而不失效。

在可能出现低温的地方，如露天甲板等，电子设备应能在低至-25℃的温度下正常工作。

2)振动 振动频率2～80 Hz，其中2～13.2 Hz时，位移幅值为±1 mm；频率13.2～80 Hz时，加速度幅值为±0.7 g。

最大加速度为0.7 g。

设备及其支架（包括单个零部件）的自身固有频率不应处在0～80 Hz范围以内。如果结构设计不能使固有频率位于0～80 Hz以外，则应附加阻尼措施，以避免振动幅值过大。

对于柴油机、压缩机和舵机舱内的设备，频率为2.0～25 Hz时，位移幅值为±1.6 mm；频率为25～100 Hz时，加速度幅值为±4.0 g。

最大加速度为4.0 g。

3)倾斜角度 各方位22.5°。

4)摇摆 横摇±22.5°，横摇周期为10秒；线性垂直加速度±1.0 g。

5)湿度 温度达40℃时，相对湿度为95～100%；温度高于40℃时，相对湿度为70%。

8.3.3 主推进机械的驾驶室遥控系统的设计，应考虑到值班驾驶员不熟练掌握机器性能的情况，为此应设有使机器按正确顺序和时间运行的控制程序，以使其安全运行。

8.3.4 自动化机舱中，对主推进机械的控制，应使主控制站的控制比驾驶室辅控制站的控制优先，就地控制站的控制比主控制站的控制优先。

9 机舱安全设备的管理

9.1 机舱安全设备

9.1.1 应急发电机

1)客船、500总吨和500总吨以上的货船在机舱或机舱外应设有应急发电机。

2)应急发电机应有独立的燃油系统、冷却系统和起动系统。

3)应急发电机应在船舶横倾22.5°或纵倾10°时有效地工作。

9.1.2 应急救火泵

1)2000总吨以下船舶的应急消防泵可为可携式应急消防泵，常用汽油机驱动的离心水泵；2000总吨和2000总吨以上的船舶应设固定式动力泵。

2)应急消防泵的原动机为柴油机或电动机。电动机电源，由主配电板和应急配电板均可供电。

9.1.3 应急空气压缩机

1)当船舶完全失去动力时，应急空气压缩机是机舱的原始动力，它运转后，可起动柴油发电机或应急柴油发电机。

2)应急空气压缩机的原动机有手动和柴油机驱动两种型式。

9.1.4　救生艇发动机

一般为手动或直流电起动的柴油机。

9.1.5　机舱应急舱底水吸口

1)机舱应设一个应急舱底水吸口，其直径应不小于泵的进口直径。

2)应急吸口一般应通向一台主海水泵并装设截止止回阀，阀杆应适当延伸，以使手轮在花铁板以上的高度至少为 460 mm。

3)应急吸口除与舱底泵相通外，还应与排量最大的一台海水泵相通，如主海水泵、消防泵、通用泵和压载泵等。

9.1.6　轴隧与水密门

1)机舱和轴隧间舱壁上应设有滑动式水密门。

2)水密门的关闭装置应能两面操纵，在远距离操纵处应设有水密门的开闭指示器。

3)轴隧应有通向露天甲板的应急通道。

9.1.7　燃油速闭阀

1)双层底以上的主机、发电机、锅炉的各油柜的供油管上，应装有速闭阀。

2)上述速闭阀除能就地关闭外，在机舱外，尚须设有遥控关闭装置。

9.1.8　机、炉舱通风机应急开关

机、炉舱通风机除能在机舱操纵外，在机舱外应设有应急遥控开关装置。

9.2　机舱安全设备管理要求

9.2.1　机动救生艇的发动机、应急消防泵、应急发电机应定期检查、养护和试验，一般应每半个月或每周发动运转试验一次，并将试验情况记入轮机日志。

9.2.2　机舱应急舱底水吸口应定期清洁，防止污物堵塞；截止止回阀应定期加油活络。

9.2.3　水密门、速闭阀、通风机的应急开关，都要定期保养，就地操纵试验和遥控试验。

9.2.4　各种应急设备必须保持良好状态。船舶到港后，应接受港务监督（或海岸警备队）登船检查。

10　海损应急处理

10.1　机舱进水时的处理

10.1.1　堵漏工具和设备

由于各种原因，如碰撞、触礁、船损等发生机舱漏水事故时，必须全力抢救，进行堵漏和排水。船上应配备下列堵漏设备：

1)轻型堵漏毯　1 条；

2)软边堵漏板　D＝450 mm，开孔 ϕ 25，1 块；

3)软边堵漏板　500×750 mm，开孔 ϕ 25，1 块；

4)金属堵漏板　600×800×6，开孔 ϕ 25，1 块；

5)活叶堵漏板　D 400×6，开孔 ϕ 25，1块；

6)金属堵漏箱　500×500×200×5，1个；

7)螺柱包括活动钩头和 T 型固定螺柱，6个；

8)活动伸缩型肋骨撑架，1个；

9)软垫，1个；

10)大小平头木塞，直径为 30～150 mm，共 13 只；

11)快干水泥 400～500 号，10 包；

12)黄沙，300 kg；

13)橡胶板 10 mm厚，约 1 m^2。

10.1.2 堵漏

1)找出漏洞位置，记下其肋骨号数；

2)判断进水速率，查看进水情况；

3)把人员组织起来，指挥船员各行其职，共同搞好抢险工作；

4)堵漏队人员于 2 分钟内赶往现场，携带堵漏工具进行堵漏。

10.1.3 排水

在堵漏同时，必须设法迅速排除机舱进水。根据进水情况可用 3 个办法排水。能否有效地排水，应根据排水管内径的大小，做出最大排水率的估算。

1)当机舱进水量不大时，应启动舱底污水泵，利用舱底水系统排除机舱积水。

2)如舱底污水泵排量较小，不能及时排除漏入的海水时，可再起动排量较大的一台与污水系统通用的其它水泵，如总用泵。

3)当机舱大量进水，采用上述两个办法无效时，可将应急吸口的截止止回阀打开，直接利用机舱排量最大的主海水泵或压载水泵排水。

10.2 船舶搁浅时的处理

10.2.1 应急处理

1)船舶搁浅后，如主机尚可允许运转，应控制转速，防止主机超高负荷运转；如不能运转，则立即停车，防止螺旋桨损坏。

2)应立即将低位海底门换为高位海底门。

3)如海水压力下降，应及时清洗滤器。

10.2.2 轴系检查

1)盘车检查。搁浅可能引起船体变形，造成轴系中心线的弯曲。停车后可用盘车机盘车检查，检查轴系运转是否受阻，盘车机电流的变化情况是否正常。

2)运转检查。如主机尚能运转，运转中应注意检查下列各项：

(1)检查中间轴轴承和尾轴的温度；

(2)检查中间轴和尾轴的跳动与振动情况；

(3)检查中间轴轴承地脚螺栓情况；

(4)检查曲柄箱的温度；

(5)检查齿轮箱的声音是否正常。

3)测量柴油机曲轴臂距差。搁浅后，应及早测量曲轴臂距差，以判断曲轴中心线的变化。如臂距差值超过允许范围，继续航行将是十分危险的。

10.2.3 双层底舱柜的检查

1)搁浅时双层底舱柜可能变形破裂，要注意检查海面有无油花漂浮等。

2)连续检查主机滑油循环柜的液位。

3)连续检查干隔舱、油水舱等双层底舱柜，如有漏水可将测量管封死。

10.2.4 舵系的检查

1)进行操舵试验，检查转舵是否受阻，判断舵系是否被擦伤和碰坏。

2)检查舵机负荷是否正常，电机电流和舵机油压是否正常。

3)检查转舵时间是否符合要求。

4)检查舵柱是否振动。

10.3 机舱灭火

10.3.1 机舱火灾报警

对难于监视火灾发生的机舱来说，为了及时发现并灭火，应装设火灾检测装置。机舱常用的火灾探测器有下列几种：

1)离子式烟雾探测器；

2)光电式探测器；

3)热式探测器。

10.3.2 机舱灭火

1)发出机舱火警时，除应变部署表中有规定职务者按规定行动外，轮机部其余人员应一律迅速进入机舱，听候轮机长或值班轮机员的统一指挥。

2)局部起火时，根据火灾性质，选用泡沫式、干粉、水、1211、CO_2等局部灭火；大面积起火，必须用CO_2。充满机舱时，应首先撤离全体人员。

3)机舱灭火时，应通过应急遥控装置或在机舱内就地进行下列控制：

(1)停止机舱通风机工作；

(2)停止燃油泵（驳运泵）工作；

(3)关闭燃油柜的速闭阀；

(4)关闭机舱天窗、通道、风斗；

4)机舱用水灭火，应注意下列各项：

(1)用水灭火，同时要进行机舱排水；

(2)不能用水灭易燃液体火灾；

(3)不能用水灭电气火灾；

(4)不宜用水灭精密设备、贵重资料火灾。

10.3.3 火区抢救

1)如需进入火区抢救人员和物资时，应组织3人抢救小组联合行动。

2)抢救小组成员应着石棉衣、戴防烟头盔和氧气面具，携带绳索互相牵引探索前进。

参考文献

〔1〕《1978年海员培训、发证和值班标准国际公约》，国际海事协商组织，1978年6月

〔2〕《钢质海船入级与建造规范》，中华人民共和国船舶检验局，1983，人民交通出版社

〔3〕《远洋船舶航行运输管理规章制度选编》(一),中国远洋运输总公司,1983年4月
〔4〕《机务监督手册》,中国远洋运输总公司,1986

第2章 机 务 管 理

1 现代管理技术

在企业管理中，为了进行预测、计划、执行和检查等，必须将生产经营活动中的诸事件予以分析、研究。为了能够客观、合理地得出分析结论，现代管理科学创造和发展了一些管理技术。其中有些适用范围很广，称为基本管理技术；有些主要是针对管理系统中某些特定过程而产生的，遂为系统管理技术。

1.1 基本管理技术

基本管理技术包括的方法很多，下面仅就与机务管理工作有关的主要几种予以简述。

1.1.1 因果分析图

因果分析图是把预料到的问题及其原因结构，按照它们的逻辑关系描绘为一个鱼刺形的图表，然后通过许多人共同讨论，对图示的原因结构加以整理、修正，从而掌握各种原因对存在问题的影响程度。

制作因果分析图的过程，一种为原因追查型，即从大原因追踪至小原因；另一种为原因因素罗列型，先将各种原因因素罗列出来，再分类汇集为中原因(能采取措施改变或避免的)和大原因（原因归类)。图1.3.2-1为寻找焊接质量不合格原因的因果分析图。

1.1.2 统计分析

统计分析是对事件发生过程中的各项数字资料和其它有关情况的搜集、整理和分析工作；对统计资料进行分组，计算指标和指数并制作相应的图表以反映事物的数量特征和规律性。

数理统计学是研究随机现象总体数量方面的理论和方法，它可根据部分信息推断出总体情况，因而已成为现代管理的重要技术手段。

1)直方图

直方图是一种有效的分析工具，它直观地反映事件的统计分布规律，例如用于质量管理的质量分布图就是一种常用的直方图。图1.3.2-2示出一批零件尺寸的分布直方图。制作直方图的一般步骤如下：

（1）随机取样，一般在100个左右，并找出数据的最大值 X_{max} 和最小值 X_{min}。

（2）将数据分成若干组 K。数据在50～100个时 $K=6\sim10$；100～200个时，$K=7\sim12$，然后估定组距 h 和各组的上、下界值。

$$h\approx\frac{X_{max}-X_{min}}{K} \tag{1.3.2-1}$$

第一组的上、下界值为 $X_{min}\pm\frac{h}{2}$，第一组的上界值就是第二组的下界值，再加上组距是第二组的上界值，以此类推。

（3）计算各组中心值 $x_i(i=1\sim K)$

$$X_i=\frac{\text{第 } i \text{ 组下界值}+\text{上界值}}{2} \tag{1.3.2-2}$$

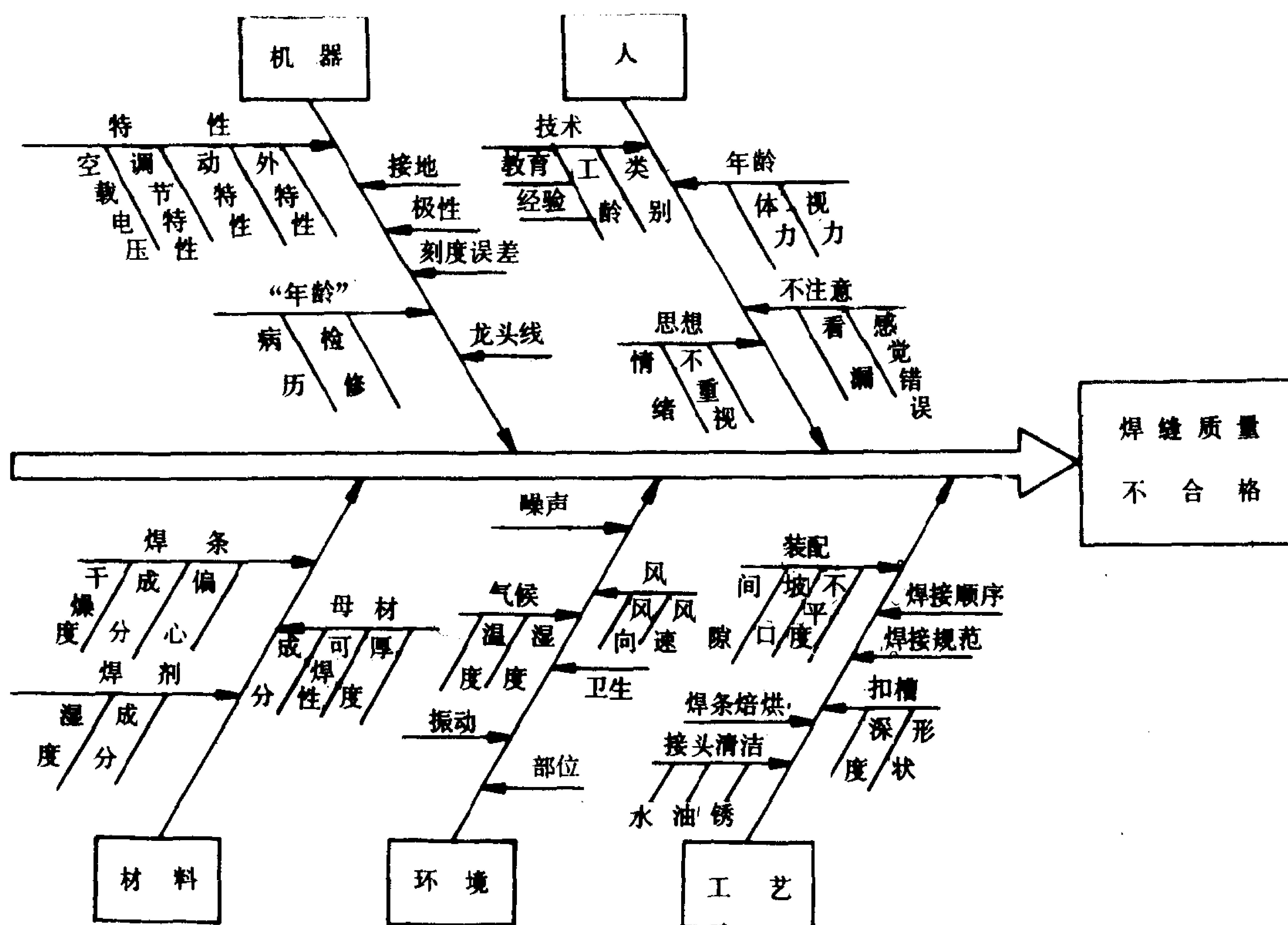


图 1.3.2-1 焊接质量因果分析图

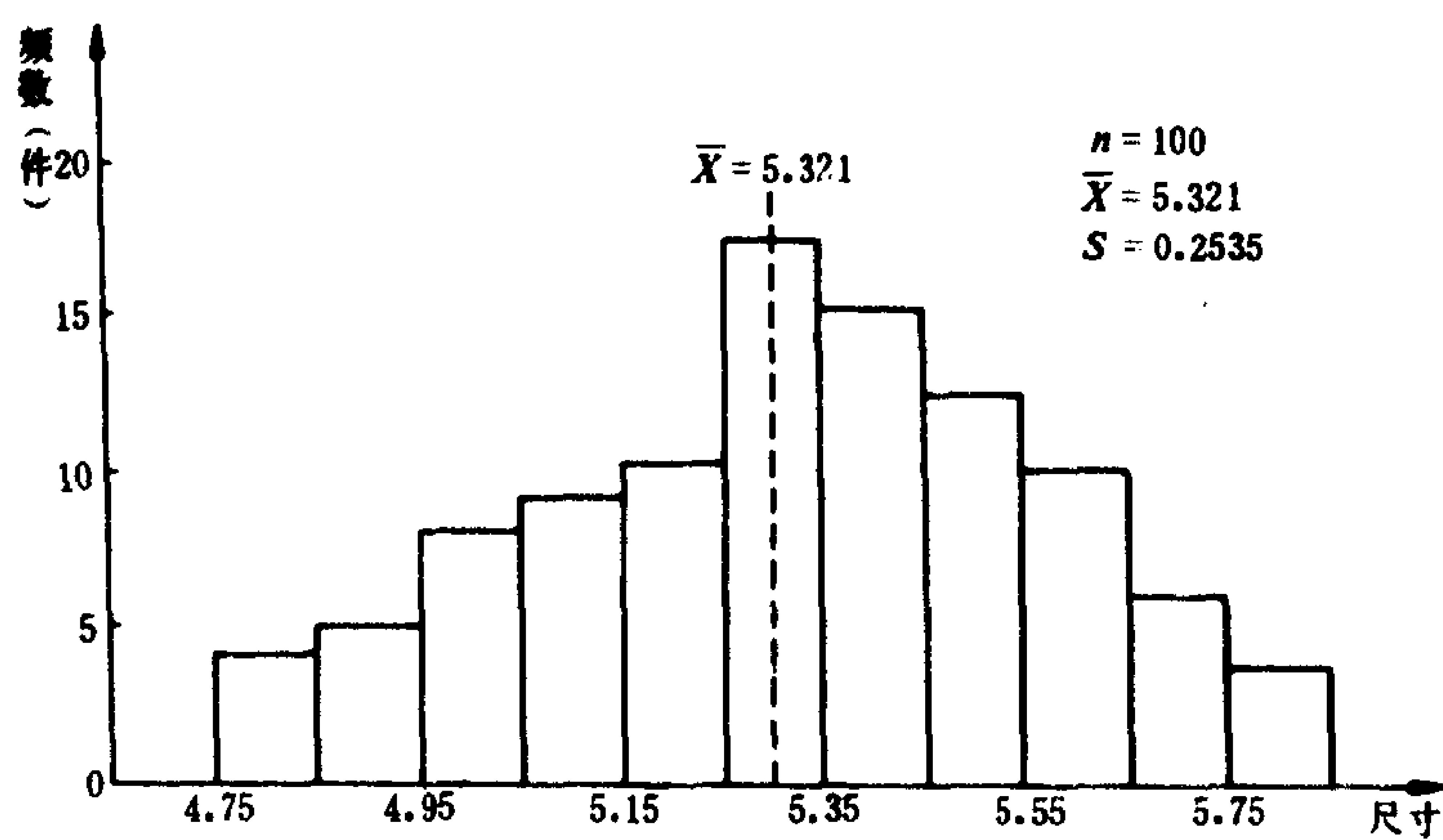


图 1.3.2-2 直方图

（4）统计落入各组的频数 f_i（即落入每组上、下界值之间的数据个数），整理成频数分布表。

（5）计算各组简化中心值 u_i

$$u_i=\frac{x_i-a}{h} \tag{1.3.2-3}$$

式中，a 为任选值，一般取频数最大那组的中心值。

（6）计算数据的平均值 $\bar{x}$ 和标准偏差 S

$$\bar{x}=a+h\frac{\sum f_i u_i}{\sum f_i} \tag{1.3.2-4}$$

$$S=h\sqrt{\frac{\sum f_i u_i^2}{\sum f_i}-\left(\frac{\sum f_i u_i}{\sum f_i}\right)^2} \tag{1.3.2-5}$$

（7）以数据为横坐标，频数为纵坐标画直方图。

例：一批零件实测值如下

5.3	5.3	5.4	5.4	5.2	4.9	5.7	5.5	5.6	5.0
4.8	5.0	5.1	5.3	5.3	5.4	5.4	5.2	5.0	5.3
5.0	5.8	5.3	5.2	5.5	5.1	4.9	4.9	5.1	5.6
5.2	5.3	5.5	5.4	4.8	5.2	5.6	5.1	5.5	5.6
5.3	5.4	4.9	5.2	5.6	4.8	5.3	5.2	5.3	5.4
5.6	5.7	5.5	5.3	5.0	5.6	5.3	5.1	5.7	5.5
5.3	5.4	5.0	5.2	5.8	5.1	5.5	5.4	5.6	5.3
5.5	5.0	5.8	5.4	5.4	5.3	5.0	5.1	5.6	5.5
5.3	5.7	5.4	5.1	5.6	5.4	4.8	5.5	5.5	5.7
5.8	5.3	4.9	5.4	5.4	5.2	5.2	5.7	5.1	5.5

其中，$X_{max}=5.8$，$X_{min}=4.8$。分为 11 组，$K=11$，得 $h=0.1$，取 $a=5.3$

组号	组距	中心值 x_i	频数统计	f_i ①	u_i ②	$f_i u_i$ ③=①×②	$f_i u_i^2$ ④=②×③
1	4.75~4.85	4.8	////	4	−5	−20	100
2	4.85~4.95	4.9	/////	5	−4	−20	80
3	4.95~5.05	5.0	////////	8	−3	−24	72
4	5.05~5.15	5.1	/////////	9	−2	−18	36
5	5.15~5.25	5.2	//////////	10	−1	−10	10
6	5.25~5.35	5.3	/////////////////	17	0	0	0
7	5.35~5.45	5.4	///////////////	15	1	15	15
8	5.45~5.55	5.5	////////////	12	2	24	48
9	5.55~5.65	5.6	//////////	10	3	30	90
10	5.65~5.75	5.7	//////	6	4	24	96
11	5.75~5.85	5.8	////	4	5	20	100

$\sum f_i=100$，$\sum f_i u_i=21$，$\sum f_i u_i^2=647$

平均值 $\bar{x}=a+h\frac{\sum f_i u_i}{\sum u_i}=5.3+0.1\times\frac{21}{100}=5.321$

标准偏差 $S=h\sqrt{\frac{\sum f_i u_i^2}{\sum f_i}-\left(\frac{\sum f_i u_i}{\sum f_i}\right)^2}=0.1\times\sqrt{\frac{647}{100}-\left(\frac{21}{100}\right)^2}=0.2535$

2）排列图

研究经济问题时，发现在诸影响因素中存在着“关键的少数和次要的多数”这一规律。排列图就是对诸因素进行分类，并按其影响程度的大小排列作图，以直观的方式反映出主要影响因素。

排列图由两个纵坐标、一个横坐标、一组直方图和一条巴雷特线所组成（图1.3.2-3）。左边的纵坐标表示频数、件数、金额或工时数等，右边的为折算频率百分比。横坐标上排列着诸因素直方形，按对问题的影响程度大小从左至右编排。直方形的高度表示因素影响的频数。巴雷特线就是一条表示各影响因素的累计频率连接折线。按巴雷特线上累计频率为80%的点，将诸因素分为主要的和次要的两大类，从而找出主要因素。

排列图用于物资管理时，称为ABC分类法。它以物资品种为横坐标，占用资金为纵坐标，利用累计资金占用百分比线将物资分为A、B、C三类，以分别采取不同的管理措施（表1.3.2-1）

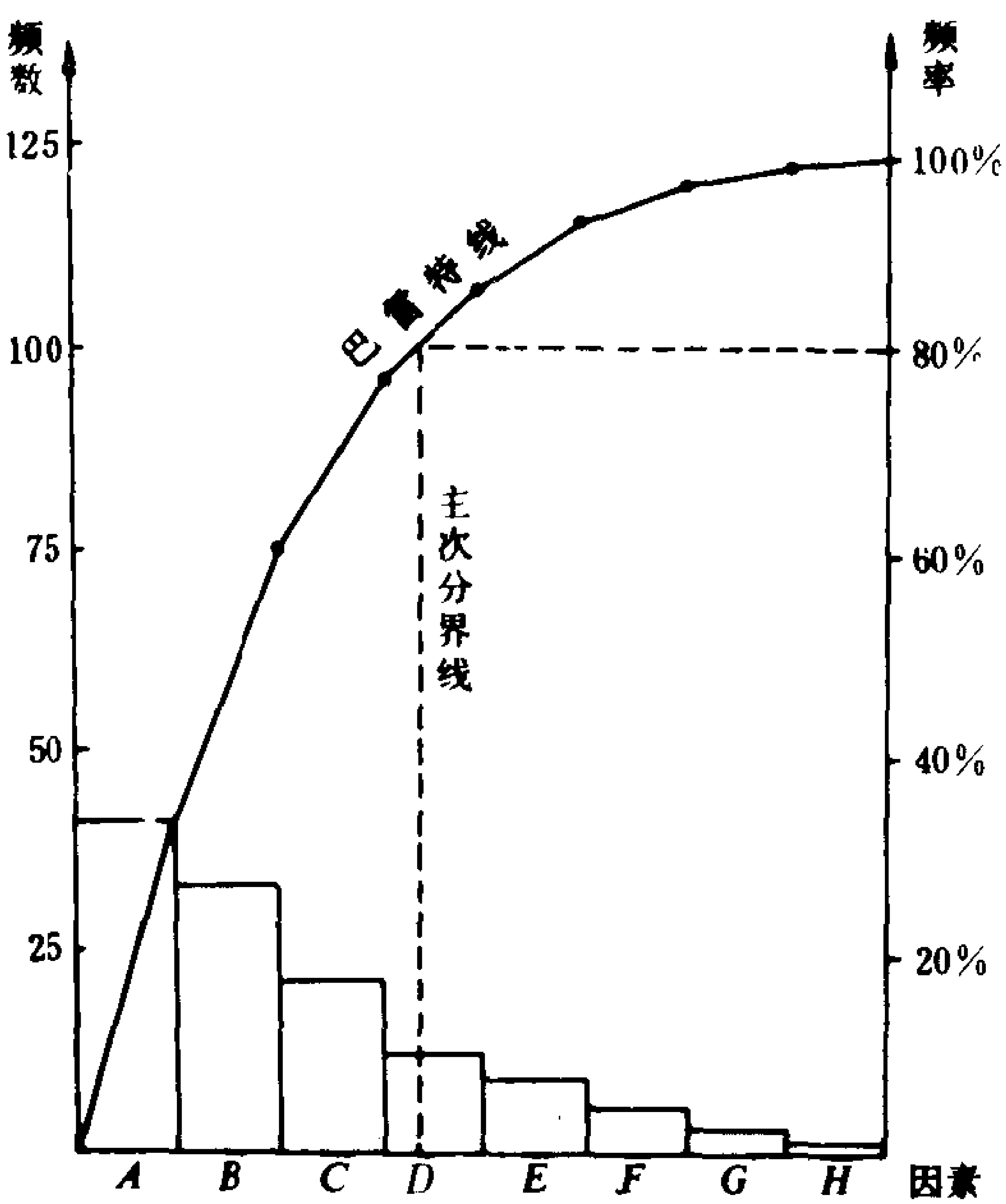


图1.3.2-3 排列图

表1.3.2-1 **ABC分类物资控制**

物资类别分类和控制	A类	B类	C类
物资品种百分数	10%以下	20%左右	70%左右
占用资金百分数	70%以上	20%左右	10%以下
控制程度	严密控制	一般控制	稍有控制
存货量计算	详细计算	根据过去记录	不计算，少了就进货
进、出记录	详细记录	有记录	无记录
存货检查情况	经常检查	偶尔检查	不检查
安全库存量	低	较多	大量

3)抽样分析法

在实际工作中，对事件的总体进行彻底普查是困难的，只能从总体中抽取若干子样，再对子样观察值加工处理为统计量，然后利用统计推断方法来估计总体参数的情况，这称为抽样分析法。

生产和管理中常为随机事件。为了描述随机事件就要了解事件的概率分布类型和分布函数的主要参数。现在统计推断中常用的方法多数仅适用于服从正态分布的事件，但生产管理中的问题恰好多数属于正态分布，即便是其它分布的随机事件，又要在子样抽取容量 n 足够大时，它的统计量的平均值也渐近于正态分布，因此，统计推断方法可广泛用于实际生产管理工作。

正态分布函数 $N(a, \sigma^2)$ 的主要参数是数学期望 a 和方差 σ^2。正态分布事件总体的 a 和 σ^2 与其子样观察值（x_1、x_2、$\cdots x_n$）的平均值 $\bar{x}$ 和方差 S^2 之间的估计关系为

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=a \qquad (1.3.2\text{-}6)$$

$$S^2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2=\frac{\sigma^2}{n} \tag{1.3.2-7}$$

子样观察值的平均值服从于正态分布 $N\left(a,\ \frac{\sigma^2}{n}\right)$。

子样是从总体中随机抽取的，所以子样观察值的统计量是随机变量，也存在着自己的分布函数。常用的子样统计量及其分布类型列于表 1.3.2-2。

表 1.3.2-2　　子样统计量及其分布类型

统计量	分布类型	符号意义
1．平均值 $\bar{x}$ $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$	正态分布 $N(a,\ \frac{\sigma^2}{n})$	a—总体的数学期望； σ^2—总体的方差；
2．统计量 U $U=\frac{\bar{x}-a}{\sigma/\sqrt{n}}$	正态分布 N（0，1）	n—子样容量； x_i—子样观察值； S—子样观察值的均方差；
3．统计量 χ^2 $\chi^2=\frac{1}{\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}(x_i-a)^2$	自由度为 n 的 χ^2分布	a_1，σ_1^2，n，S_1^2—服从于正态分布 N（a_1，σ_1^2）的甲总体的数学期望，方差，子样容量和子样观察值的方差；
4．统计量 t $t=\frac{\bar{x}-a}{s/\sqrt{n}}$	自由度为$(n-1)$的 t 分布	a_2，σ_2^2，m，S_2^2—同上，但属于正态分布 $N(a_2,\ \sigma_2^2)$ 的乙总体。
5．统计量 F $F=\frac{S_1^2/\sigma_1^2}{S_2^2/\sigma_2^2}$	第一自由度为 $n-1$，第二自由度为 $m-1$的 F 分布	

利用抽样统计对总体参数进行估计分为：

（1）点估计　用子样观察值建立的一个统计量作为总体某参数的估计值，如 $\bar{x}=a$。

（2）区间估计　先预定一个显著性水平 α，然后从子样观察值的统计量求出当概率为（$1-\alpha$）时，包含着总体参数真值 θ 的区间［T_1，T_2］。T_1 和 T_2为上、下置信限，($1-\alpha$) 称为置信水平。例如有百分之九十的把握认为某设备的效率在 80%～90%之间，这种表达方式就是区间估计。

对于服从于正态分布 $N(a,\ \sigma^2)$ 的总体，用抽样分析对其a 和 σ^2的区间估计方法示于表 1.3.2-3。

表 1.3.2-3　　a 和 σ^2 的区间估计

估计参数 步骤	总体数学期望 a （已知 σ^2）	总体数学期望 a （不知 σ^2）	总体方差 σ^2
1．计算子样观察值	由子样观察值 x_1，x_2，x_3，$\cdots x_n$ 计算平均值 $\bar{x}$	计算子样观察值的平均值 $\bar{x}$ 和方差 S^2	计算子样观察值的方差 S^2
2．设定显著性水平 α	通常设为 0.1，0.05 或 0.01	同左	同左
3．查表求 λ 值	由正态分布数值表查出满足等式$P(\lvert\frac{\bar{x}-a}{\sigma/n}\rvert\leq\lambda)$ $=1-\alpha$ 时的 λ值	查 t 分布的临界值表，求得满足等式$P(\lvert\frac{\bar{x}-a}{S/\sqrt{n-1}}\rvert$ $\leq\lambda$）$=1-\alpha$ 时的λ 值	查 χ^2 分布的临界值表，当自由度为（$n-1$）时满足于 $P(\frac{nS^2}{\sigma^2}\geq\lambda_1)=\frac{\alpha}{2}$ 和 $P(\frac{nS^2}{\sigma^2}\geq\lambda_2)=1-\frac{\alpha}{2}$时的$\lambda_1$ 和 λ_2 值
4．置信水平为（$1-\alpha$）时的置信区间	$[\bar{x}-\lambda\frac{\sigma}{\sqrt{n}},\ \bar{x}+\lambda\frac{\sigma}{\sqrt{n}}]$	$[\bar{x}-\lambda\frac{S}{\sqrt{n-1}},$ $\bar{x}+\lambda\frac{S}{\sqrt{n-1}}]$	$[\frac{nS^2}{\lambda_1},\frac{nS^2}{\lambda_2}]$

4)假设检验

假设检验是利用子样提供的信息来检验对总体情况（参数或分布类型）所下的假设估计是否成立。这种检验的理论依据是小概率事件原理，即概率很小的事件在一次试验中是几乎不可能发生的。如果要检验某假设 H_0 是否成立，不妨先认为 H_0 是正确的，并在此条件下构造一个小概率事件 A，例如发生概率为 0.05，然后进行一次试验。若 A 事件发生了，则表明该假设 H_0 不能成立；如 A 没有发生，则 H_0 成立。

假设检验程序分为三个主要步骤：

（1）提出原假设 H_0（又称零假设），这就是所要检验的对象。有时为了加深研究，又再提出一个相反的假说 H_1（备选假设）。

（2）按子样提供的信息，建立检验统计量 U。

（3）按统计量分布类型，确定在显著性水平 α 时 H_0 的否定域的临界值 u_α。如统计量 U 落在否定域中，则在置信水平 $(1-\alpha)$ 下否定 H_0，接受 H_1。反之，接受 H_0。

服从于正态分布 $N(a_0,\ \sigma_0^2)$ 的总体的各种检验程序示于表 1.3.2-4。

1.1.3 回归分析

对那些从实践中得知互有影响，但目前尚不能从理论上确定其函数式的因素关系，称为相关关系。用统计方法将诸因素的相关关系近似地用函数式来描述，就是相关分析。如在相关关系中，视为自变量的因素与需要预测的因变量之间存在着不可逆转的因果关系，则对它们的关系的函数处理叫作回归分析。回归分析按因素的数量和关系不同，可分为线性和非线性，一元和多元等，最常用的是一元线性回归分析。

由回归分析得到的回归方程与由理论推导出来的函数式不同，在使用时要注意以下几点：

①回归分析中存在因果关系，所以回归方程不能逆转，即自变量和因变量关系是不能任意改变的。

②回归方程是从概率统计以最小二乘法原理建立起来的，所以方程两端的变量一般不能移项。

③诸变量之间并不一定存在符合量纲法则的关系。

④所得结果只是统计估计值，并且不能用外推法。

下面通过一元线性回归分析来说明一般分析方法。

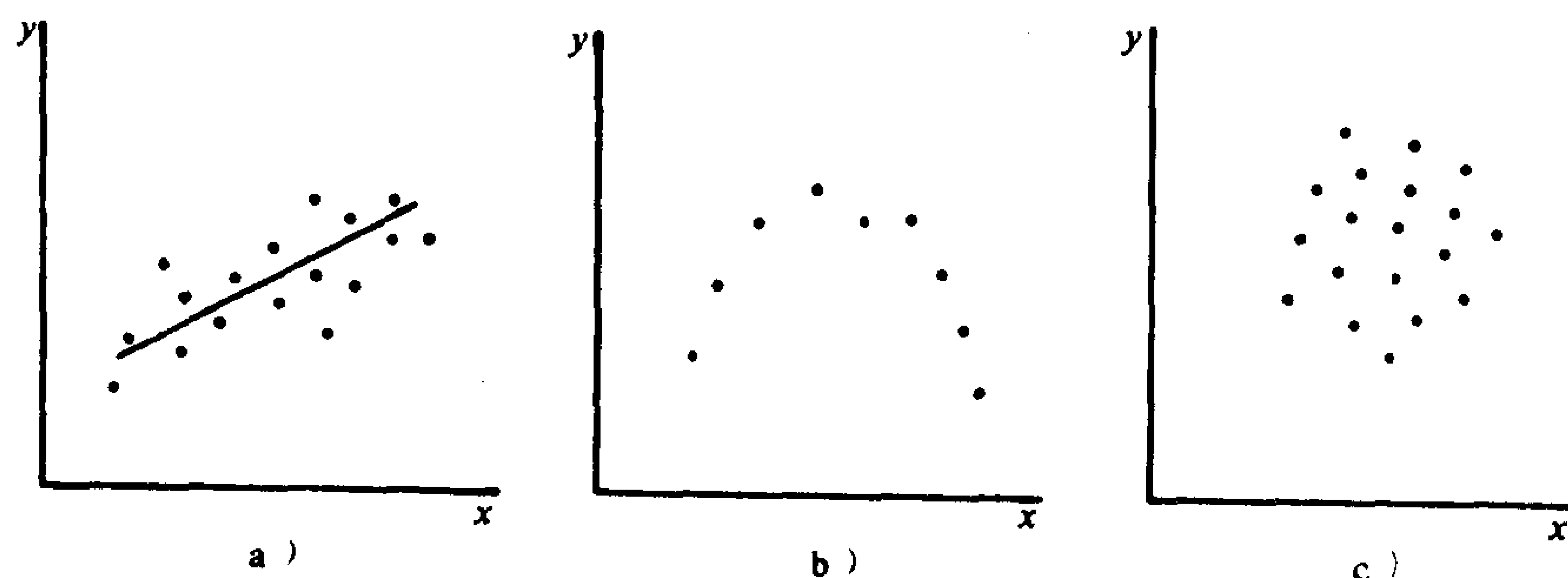


图 1.3.2-4　散布图

a)线性相关；b)非线性相关；c)不相关

（1）配回归方程

通过试验将自变量 X 与因变量 Y 的观察值 x_i 和 y_i 成对地列入统计表，再在 $X-Y$ 平面坐标上绘出散布图（1.3.2-4）

按散布图确定回归方程模型。如为线性相关，其模式为

$$Y=a_0+a_1X \tag{1.3.2-8}$$

若属于非线性，在某些情况下可予以线性化，如幂函数、指数函数和对数函数等。

用最小二乘法可求得方程中的常数项 a_0 和回归系数 a_1。

$$a_0=\frac{\sum y_i\sum x_i^2-\sum x_i\sum x_iy_i}{N\sum x_i^2-(\sum x_i)^2} \tag{1.3.2-9}$$

$$a_1=\frac{N\sum x_iy_i-\sum x_i\sum y_i}{N\sum x_i^2-(\sum x_i)^2} \tag{1.3.2-10}$$

（2）相关系数

相关系数 r 用以衡量因素间的相关密切程度。

$$r=\frac{\sum x_iy_i-\frac{\sum x_iy_i}{N}}{\sqrt{[\sum x_i^2-\frac{(\sum x_i)^2}{N}][\sum y_i^2-\frac{(\sum y_i)^2}{N}]}}\quad(-1\leq r\leq 1) \tag{1.3.2-11}$$

$r>0$ 时，X 与 Y 正相关，Y 随 X 而增；

$r<0$ 时，X 与 Y 负相关，Y 随 X 而减；

$r=0$ 时，X 与 Y 不相关；

$r=\pm1$ 时，Y 仅与 X 这一个因素有关。

r 值越小，X 与 Y 的相关性越少，表明尚有其它因素对 Y 有影响

（3）回归方程的统计检验和区间估计

回归分析所用的子样是随机抽取的，所得到的回归方程能否适用，需要通过显著性检验和区间估计。检验时方程系数 a 和 a_0 可用 t 统计量（参见表 1.3.2-4），通常显著水平取 $\alpha=0.05$。

1.2 系统管理技术

1.2.1 试验设计

在科学试验时，先要明确试验目的，据此选准试验的特性指标和影响指标的试验因子，定出诸因子在试验时的状态水平，以及各因子在每次试验中的合理水平搭配，并确定适当的试验次数，以求试验结果准确、试验工作量少和便于分析，这些统称为试验设计。

一般可根据试验特性指标来判断各因子的影响显著程度，如从直观上难以判定时，可应用方差分析来判定。

1）试验因子

应选用在技术上能控制的作为试验因子，如温度、压力、浓度和品种等等。每个因子对特性指标的影响称主效应，但是某些因子间的交互作用也有强烈影响，这一交互效应也要作为单独因子看待。因子的水平数和数量范围与试验性质有关，对研究性试验，水平范围要大；一般生产试验，可将水平限制在经验范围。如为了找出因子在不同水平时对特性指标的影响差别，则水平数要少，但重复试验次数要多些。对于要求作出特性指标的回归分析，水平数应多，重复试验宜少。若已知因子水平变化的数应为线性关系时，可只选变化范围两端的水

表 1.3.2-4　　假　设　检　验

检验问题	一个总体时的 a 检验，已知 $\sigma^2,(\sigma^2=\sigma_0^2)$	一个总体的 a 检验 σ^2未知	两个总体时，a 的比较 $\sigma_1^2=\sigma_2^2=\sigma_0^2$，$n_1\neq n_2$	两个总体时，a 的比较 $\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$，$n_1=n_2=n$	一个总体时的 σ^2 检验	两个总体时的 σ^2 比较 $n_1\neq n_2$
提出假设	$H_0: a=a_0$ $H_1: a>a_0$ 或 $a<a_0$ 预定 α(0.05 或 0.1)	$H_0: a=a_0$ $H_1: a>a_0$ 或 $a<a_0$ 预定 $\alpha=0.05$ 或 0.1	$H_0: a_1=a_2$ $H_1: a_1\neq a_2$ 预定 $\alpha=0.05$ 或 0.1	$H_0: a_1=a_2$ $H_1: a_1\neq a_2$ 预定 $\alpha=0.05$ 或 0.1	$H_0: \sigma^2=\sigma_0^2$ $H_1: \sigma^2>\sigma_0^2$ 或 $\sigma^2<\sigma_0^2$ 预定 $\alpha=0.05$ 或 0.1	$H_0: \sigma_A^2=\sigma_B^2$ $H_1: \sigma_A^2>\sigma_B^2$ 或 $\sigma_A^2<\sigma_B^2$ 预定 $\alpha=0.05$ 或 0.1
计算统计量	子样平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum x_i$ 统计量 $u_0=\frac{\bar{x}-a}{\sigma_0/\sqrt{n}}$	子样平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum x_i$ 子样方差 $S^2=\frac{1}{n-1}\sum(x_i-\bar{x})^2$ 统计量 $t_0=\frac{\bar{x}-a}{S/\sqrt{n}}$	子样平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n_1}\sum x_i$ $\bar{y}=\frac{1}{n_2}\sum y_i$ 子样方差 $S_1^2=\frac{1}{n_1-1}\sum(x_i-\bar{x})^2$ $S_2^2=\frac{1}{n_2-1}\sum(y_i-\bar{y})^2$ 统计量 $t_0=\sqrt{\frac{n_1n_2(n_1+n_2-2)}{n_1+n_2}}\times\frac{\bar{x}-\bar{y}}{\sqrt{n_1S_1^2+n_2S_2^2}}$	子样差的平均值 $d_i=x_i-y_i$ $\bar{d}=\frac{1}{n}\sum d_i$ 子样差的方差 $S_d^2=\frac{1}{n-1}\sum(d_i-\bar{d})^2$ 统计量 $t_0=\frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}}$	子样平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum x_i$ 子样方差 $S^2=\frac{1}{n-1}\sum(x_i-\bar{x})^2$ 统计量 $\chi_0^2=\frac{nS^2}{\sigma_0^2}$	子样平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n_1}\sum x_i$ $\bar{y}=\frac{1}{n^2}\sum y_i$ 子样方差 $S_A^2=\frac{1}{n_1-1}\sum(x_i-\bar{x})^2$ $S_B^2=\frac{1}{n_2-1}\sum(y_i-\bar{y})^2$ 统计量 $F_0=\frac{(n_2-1)n_1S_A^2}{(n_1-1)n_2S_B^2}$
检验	按正态分布表求 $u(2\alpha)$ 当 $\alpha=0.05,u(2\alpha)=1.64$ $\alpha=0.1,u(2\alpha)=2.05$ 当 $H_1:a>a_0$ 时 $u_0\geq1.64$ 否定 H_0 $u_0<1.64$ 接受 H_0 当 $H_1:a<a_0$ 时 $u_0\leq-1.64$ 否定 H_0 $u_0>-1.64$ 接受 H_0	按 t 分布表求 $t_{2\alpha}(n-1)$ 当 $H_1:a>a_0$ 时 $t_0\geq t_{2\alpha}(n-1)$ 否定 H_0 $t_0<t_{2\alpha}(n-1)$ 接受 H_0 当 $H_1:a<a_0$ 时 $t_0\leq t_{2\alpha}(n-1)$ 否定 H_0 $t_0>t_{2\alpha}(n-1)$ 接受 H_0	按 t 分布表求 $t_\alpha(n_1+n_2-2)$ 当 $t_0\geq t_\alpha(n_1+n_2-2)$ 时 否定H_0 $t_0<t_\alpha(n_1+n_2-2)$ 时， 接受H_0	按 t 分布表查 $t_\alpha(n-1)$ 当 $t_0\geq t_\alpha(n-1)$ 否定 H_0 $t_0<t_\alpha(n-1)$ 接受 H_0	按 χ^2 分布表求 $\chi_{1-\alpha}^2(n-1)$ 或 $\chi_\alpha^2(n-1)$ 当 $\chi_0^2\leq\chi_{1-\alpha}^2(n-1)$ 或 $\chi_0^2\geq\chi_\alpha^2(n-1)$ 时，否定 H_0; $\chi_0^2>\chi_{1-\alpha}^2(n-1)$ 或 $\chi_0^2\leq\chi_\alpha^2(n-1)$ 时，接受 H_0	按 F 分布表求 $F_\alpha(n_2-1,n_1-1)$ 当 $F_0\geq F_2(n_2-1,n_1-1)$ 时，否定 H_0 $F_0<F_\alpha(n_2-1,n_1-1)$ 时，接受 H_0

平进行试验；若为非线性，则需间选 3 ～ 4 个水平。

2）试验次数

试验时若将各因子的每个水平都全部交叉搭配一次，则称为完全水平组合试验。如有 h 水平的因子 r 个，k 水平的 l 个，q 水平的 p 个…等等，则试验次数 m为

$$m=h^{r}k^{l}q^{p}\cdots$$

这样，如将各级相互效应也作为单独因子，则试验次数就太多。一般只挑选那些具有明显影响的交互效应，或只从完全水平组合中挑选出一部分水平组合予以试验。

从数据误差精度出发，试验次数 M 应为

$$M>1+\sum F \tag{1.3.2-12}$$

式中：$\sum F$——全部因子的自由度之和。

因子的自由度是其水平数减 1，交互效应的自由度为所交互的主因子的自由度之积。在考虑全部交互作用时，若 $M>m$，则必须作重复试验。

3）正交表

试验设计方法很多，目前广泛采用正交试验设计，利用根据统计规律制定的标准正交表来安排多因子试验。

正交表的型号以 $L_{n}(r^{m})$ 表示，n 为试验次数，m 为因子数，r 为因子水平数。常见的正交表有：$L_4(2^3)$、$L_8(2^7)$、$L_{16}(2^{15})$、$L_9(3^4)$ 和 $L_{27}(3^{13})$等等。在因子的水平数不同时用混合水平正交表，如 $L_8(4^1\times2^4)$、$L_{32}(8^1\times4^6\times2^6)$ 等。下面示以 $L_8(2^7)$ 正交表作为一例。

$L_8(2^7)$

试验号＼列号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	2	2	1	2
2	2	1	2	2	1	1	1
3	1	2	2	2	2	2	1
4	2	2	1	2	1	2	2
5	1	1	2	1	1	2	2
6	2	1	1	1	2	2	1
7	1	2	1	1	1	1	1
8	2	2	2	1	2	1	2

两列的交互列

1	2	3	4	5	6	7	列号
	7	6	5	4	3	2	1
		5	6	3	4	1	2
			7	2	1	4	3
				1	2	3	4
					7	6	5
						5	6

选用正交表的基本原则是：

（1）试验水平组合数要与表的试验次数相同。

（2）试验因子水平数与所在列号的水平个数一致。

（3）正交表的列号要多于因子数。

（4）交互作用因子的列号要按该表的交互列表进行。

在需要作重复试验时，可按所选正交表的水平组合重复试验一次。若在实际试验中，发现现有正交表不适用时，可对它加以改造。

1.2.2 计划评审技术（*PERT*）

计划评审技术是一种以时间因素为中心，对工程计划进行评价、调整和控制进度的方法。

1）绘制 *PERT* 网络

先将工程分解为若干基本项目（事件），确定各项目的执行先后次序，估计项目执行时间，然后将计划流程绘成 *PERT* 网络（图 1.3.2-5）。

网络中每个箭头代表一个基本工程项目，上面标出该项目的估计执行时间。每个节点表

示项目开始或终了时间。两个节点之间只能有一个箭头，节点的编号按箭头方向从小到大。

2）计算时间

最早时刻　指基本项目开始执行（或终了），这一事件能够发生的最早时间。如上图中事件⑤的最早时刻为 16，而不是 12。

最晚时刻　指在不延误整个工程完成日期时允许该事件开始发生的最迟时间。如上图中事件①、②、③和⑤分别为 0 、 4 、10、和 16。

余裕时间　某事件的最晚时刻与最早时刻之差。

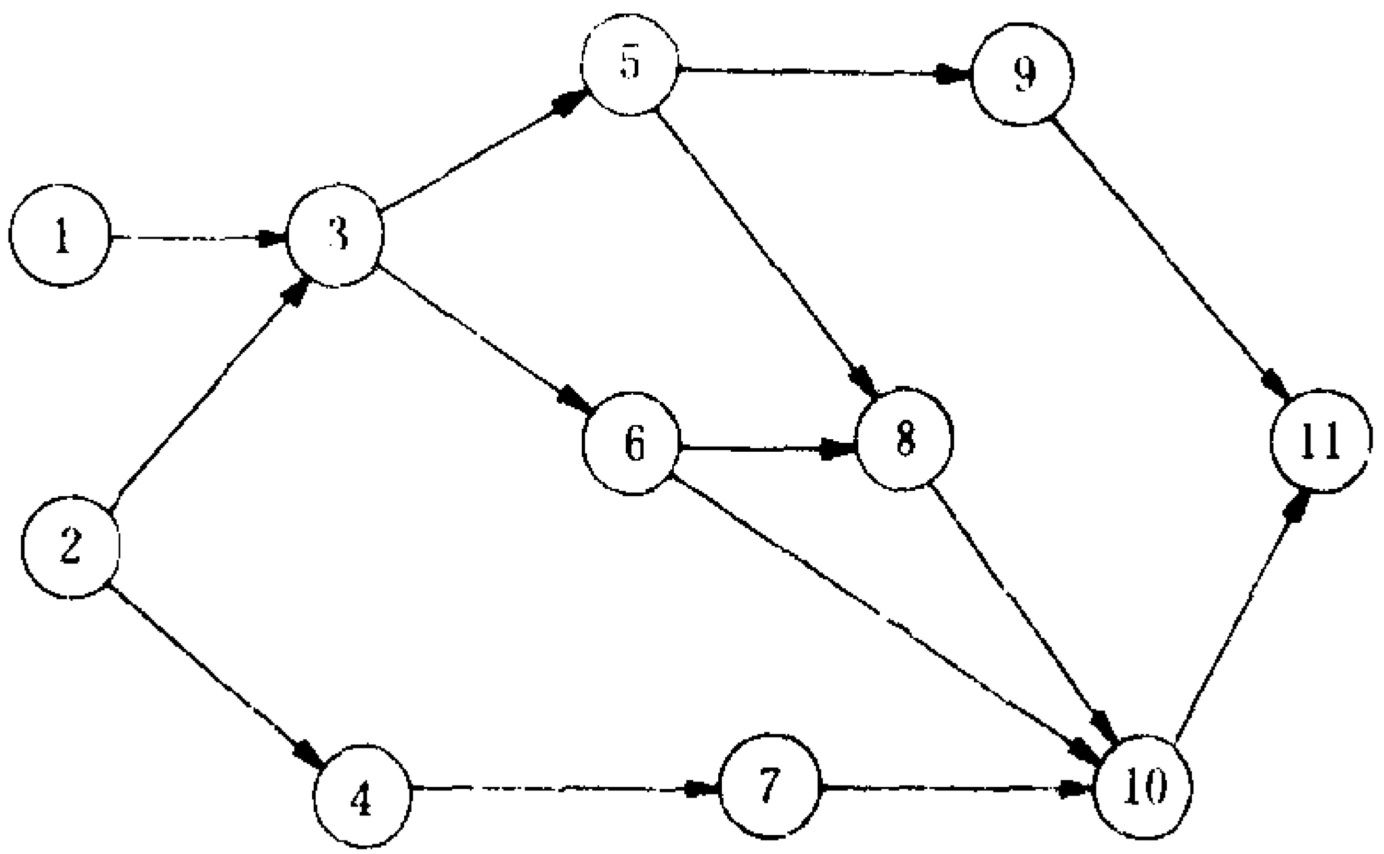


图 1.3.2-5　*PERT* 网络

时间的数学期望和方差　项目执行时间很难估计准确，一般可由有经验人员对执行时间作出"最可能"、"最乐观"和"最悲观"的三种估计时间 m、a 和 b。据此求出执行时间的期望值 t_e 和方差 σ。

表 1.3.2-5　*PERT* 信息输入表

事件编号	先行事件			随后事件		
	事件号	估计执行时间		事件号	估计执行时间	
		期望值	方差		期望值	方差
11	10 9	4 5	5 3			
10	8 7 6	8 6 1	10 5 2	11	4	5
9	5	7	5	11	5	3
8	6 5	3 5	4 7	10	8	10
7	4	2	4	10	6	5
6	3	5	5	8 10	3 1	4 2
5	3	6	5	8 9	5 7	7 5
4	2	5	10	7	2	4
3	2 1	6 10	7 6	5 6	6 5	5 5
2				3 4	6 5	7 10
1				3	10	6

$$t_e=\frac{1}{3}[2m+\frac{1}{2}(a+b)] \quad (1.3.2\text{-}13\,a)$$

$$\sigma^2=(\frac{b-a}{6})^2 \quad (1.3.2\text{-}13\,b)$$

3）信息输入输出表

将工程中每一项目的执行时间的期望值和方差，分别填入输入表的相应栏目，如表1.3.2-5所示。此为用于图1.3.2-5 *PERT* 网络的输入表。

按输入表计算每一事件的最早和最晚时刻的期望值和方差，组成信息输出表。由上述输入表得到的输出表示于表1.3.2-6。

表1.3.2-6 **信息输出表**

事件号	最早时刻		最晚时刻		余裕时间	原订日程	完成计划概率
	期望值	方差	期望值	方差			
11	33	33	33	0	0	30	0.3
10	29	28	29	5	0	26	0.29
9	23	16	28	3	5	21	0.31
8	21	18	21	15	0	20	0.41
7	7	14	23	10	16	10	0.79
6	15	11	18	19	3	13	0.27
5	16	11	16	22	0	15	0.38
4	5	10	21	14	16	6	0.62
3	10	6	10	27	0	8	0.21
2	0	0	4	34	4	—	—
1	0	0	0	33	0	—	—

某事件的最早时刻期望值和方差，按导至该事件的路线中各项目执行时间的期望值之和及方差之和计算。如事件⑦分别为5+2=7　和　10+4=14。若从网络起点至该事件有若干条路线，例如事件⑧就有①⟶③⟶⑤⟶⑧；①⟶③⟶⑥⟶⑧；②⟶③⟶⑤⟶⑧和②⟶③⟶⑥⟶⑧四条路线，则选其中的最大值为最早时刻。

某事件的最晚时刻是将终点的最早时刻期望值与从该事件至终点的路线中各项目总执行时间的差值，其方差为这些项目的方差之和。如事件⑦的最晚时刻期望值为33－(6＋4)＝23，方差为5＋5＝10。

4）关键路线

将 *PERT* 网络中那些余裕时间为零的节点联接起来，即为关键路线。凡在关键路线上的项目都是影响计划进度的关键项目，执行时必须予以抓紧。

1.2.3　价值工程（VE）

价值工程又称价值分析，是一种技术经济分析方法。它通过“功能—成本”分析来实现最佳价值方案。

价值工程用“价值”来评价事物有益程度

$$价值=\frac{功能}{费用}$$

为获得同样功能所耗费的成本越低，则价值越高。价值工程认为，用户购买产品（劳务）不是为了获得产品本身，而是为了产品所具有的功能。如果产品中有些功能并非用户所要求的，则为不必要功能，应当剔除；对不足的功能则应补充。那些用于不必要功能的成本为不必要成本，应尽量避免发生。

价值工程以提高产品价值为目的，着眼于寿命周期成本，即不仅要降低生产费用，还要考虑降低使用费用；还要着眼于功能分析，找出实现所需功能的最佳方案。

价值工程的具体活动示于表1.3.2-7

表1.3.2-7　**价值工程活动程序**

阶段	活动程序		对应问题	采用方法
	基本内容	详细步骤		
分析	1．功能定义	1．对象选择	1．这是什么?	优先选择 1）成本高、结构复杂者 2）质量低、用户意见大者 3）批量大、有可能改进者 4）投入小，易见成效者
		2．情报收集		1）面谈法 2）观察法 3）书面调查法
		3．功能定义	2．它的功能是什么?	1）表述简明准确; 2）尽量用可定量的名词; 3）扩大思路。
		4．功能整理		1）制作功能卡片 2）提问法 3）绘制功能系统图
	2．功能评价	5．功能成本分析	3．每项功能的成本是多少?	功能成本分析法 1）估算构件成本 2）每一构件承担的功能项目 3）按承担功能分配该构件的成本 4）每一功能的成本累计
		6．功能评价	4．它的价值多少?	寻求功能评价值 1）实际调查法 2）设想估计法 3）辅助功能比例估算法 4）理论计算法 运用相对评价方法 1）01评分法 2）04评分法 3）定量评分法 4）逻辑程序流程法
		7．确定分析对象领域	5．什么是主要改进领域?	1）ABC分析法 2）价值判别法 3）零（部）件成本差额选定法 4）零部件价值分析比较法
综合评价	3．制定改进方案	8．创造与思考	6．有其它方法实现这一功能吗?	1）头脑风暴法（*BS*法） 2）缺点列举法 3）希望列举法 4）哥顿法 5）类比法 6）检查提问法 7）入出法
		9．概略评价	7．新方案的成本多少?	1）优缺点列举法 2）定量评价法
		10．具体化，调查	8．最好的方案是哪一个?	
		11．详细评价	9．新方案能满足功能要求吗?	定量评价法 1）加法评分法 2）矩阵比较法 3）效果成本分析法 样品验证 模型验证 理论验证
		12．正式提案		

2　水运企业船技部门的日常工作

2.1　船舶技术状态的监督管理

水运企业船技部门对所属船舶技术状态的监督管理，其目的首先是保证航行安全、维持规定的营运船速、保持船舶动力装置处于正常技术状态；其次是研究船队的技术状态、总结技术管理经验、提高经济性和使用寿命。

中国远洋运输总公司为加强船舶现代化科学管理，提高技术管理水平，制定了《机务监督细则》，正在推广实施之中。海运局或轮船公司也已制定了《船技处职责》并配备指导轮机长、机务工程师与机务助理工程师。

公司配备的机务监督员或机务工程师等在船技处领导下全面负责主管船舶的机务管理工作。

机务监督人员的职责是：

1)对主管船舶定期按机务监督检查内容进行全面检查。

2)指导和监督检查船舶贯彻执行机务方面的规章制度、技术标准、技术定额。

3)检查船员在机务方面的劳动态度和劳动纪律。

4)指导和督促船舶制定和落实予防检修计划。

5)督促办理船舶证书和执行有关公约和法规。

6)指导并监督安全生产，处理机损和污染事故。

7)阅处船舶报表。

8)负责船舶的修理与航修。

9)监督船舶的备件管理。

10)监督船舶的热工管理与节能。

11)负责新造船舶与买船的机务监督。

12)负责船舶的革新改造。

13)对船舶的退役、报废、改变用途，作出技术鉴定。

14)掌握船舶有关技术干部的工作情况。

2.2　修船工作

修船工作是保持船舶良好技术状态、保持船级或保证船舶适航状态的重要环节，是船技处和机务监督人员的重要任务。

2.2.1　修船计划的编制

1)修船计划按种类分年度修船计划、季度修船计划和月度修船计划。

2)船技处编制修船计划应根据船队的实际情况，如船龄、技术状态、修理间隔期、航线等，分别给予恢复性修理或维持性修理。

3)船技处汇总监督员所编制的来年船舶岁修和检修计划后，应在本年的十月底编妥本公司来年的修船计划，报送总公司综合平衡，审批下达。计划应包括各船的修理类别、进厂时间，修理费用、船厂选择等。

4)船技处应本着保证质量、缩短修期、降低费用的精神，根据择优选厂、就近修船、立足国内的原则选择船厂。

2.2.2 修船项目的审核。

1)修理单分坞修、甲板、轮机、电气四个部分。根据公司修船计划，指导船舶编写修理单。

2)在修船前三个月核定船舶修理单，对远航船舶应适当提前进行。

3)审批修理项目，核定修理单，一般岁修工程在国内港口审核；对重大修理工程特别是技术资料不全，无法了解到设备真实情况的工程以及大的海损、机损事故修理应进行现场审核。

4)修理单应根据船厂要求的时间提前送交船厂报价，并尽可能安排船厂人员上船察看工程。

2.2.3 修船经费

1)船技处应在编制年度财务预算中安排修船经费。

2)根据公司批准的年度修船经费预算，分配各船的修理费用和确定修船类别。

3)修理单审定后，船技处可向各船厂报价。组织报价可以节省修船费用，缩短修期、提高修船质量，同时也加强船厂的竞争能力。

4)审核修理帐单、修理费和与机务管理有关的各种奖励费用。

2.3 备件管理

2.3.1 备件的储备

1)在保证航行安全和满足船检规范的前提下，应尽可能减少公司备件的储备量。

2)船技处应对各类船舶制定备件定额。

3)督促检查各船建立备件清册和备件的增、耗报告制度。

2.3.2 经费分配

1)船技处应在年度财务预算中安排备件经费。

2)经费分配应根据各船的技术状态、管理水平、修船类别、航线、船存备件情况等统筹考虑。

3)备件经费应由船技处统一使用，一般不下达给船舶。

2.3.3 备件审核

(1)轮机备件的年度申购计划由船技处会同监督员进行审核。

(2)重大备件的更换应事先征得船技处批准。

2.3.4 备件报价和订购

1) 船技处应广泛向供应商（厂）询价，根据报价进行订货，以便购到价廉质优的备件。

2) 为了准确迅速地购到需要的备件，应按备件编号册填写订购单。如无备件编号册时，应将备件所属设备的制造厂名、机型、出厂号、备件的名称、图号和规格等填写清楚。

3)除少量急用者外，备件一律不要空运。

4)订购的备件要认真验收，如型号、规格不符或质量不佳，应及早退货。

2.4 油料管理

2.4.1 船技处应制定各船燃料消耗定额。

(1)制定主机的燃料消耗定额。

(2)制定发电柴油机的燃料消耗定额。

（3）制定锅炉的燃料消耗定额。

2.4.2 审定各轮燃油、滑油使用表，推广劣质燃油的使用和各种节油措施。

2.4.3 审查船舶航次燃、润料消耗报告，登船测量核查燃油实存数量，核发节油奖金。

2.4.4 向油公司订购油料，决定船舶加油港口、加油数量和燃油品种。

2.4.5 滑油的处理

（1）督促船舶定期取油样化验。

（2）建立各轮化验单档案，及时分析各轮滑油使用情况。

（3）对机油更换牌号和报废，船技处应严格审查批准，并审查船舶提出的处理办法。

2.5 船舶的监造和监修

2.5.1 船舶的建造和建造合同

1)公司建造新船时，船技处应根据航运需要和财务支付能力，制订出所需订购新船的主要技术营运数据，或详细技术说明书，以便向船厂询价，其主要技术参数是:

（1）船舶总长和总宽的最大限度。

（2）夏季满载最大吃水和载重量。

（3）船舶用途。

（4）最小舱容系数。

（5）夏季满载时航速。

（6）是否重货加强和冰区加强。

（7）机舱自动化和主机遥控要求及程度。

（8）续航力包括重燃油、重柴油、柴油和淡水的容量。

（9）按何规范建造，符合哪些国际公约和其它规则。

(10)主、副机和锅炉的型号。

(11)货舱分布，舱盖型式。

(12)装卸设备。

(13)机舱和住舱的位置与要求。

2)根据船厂报价、交船期、付款条件、船厂声誉等进行选厂建造，对选中的船厂约定合同谈判的日期和地点。合同谈判包括技术谈判和商务谈判。

（1）技术谈判主要是确定全船的设备、性能、材料和标准，主要技术资料有:

①船舶技术说明书（船体、轮机和电气）。

②总布置图。

③机舱布置图和机舱设备明细表。

④船中横剖面图。

⑤基本结构图。

⑥船壳展开图。

⑦电力和蒸汽平衡表。

⑧甲板、轮机、电气的属具和物料清册。

技术谈判的结果以称为技术修改协议书的文件定下来，并由双方代表签字，此文件作为合同的第一附件。

（2）商务谈判的内容是船价和合同条款。合同的基本内容应包括:

①甲乙双方全名。

②合同目的（建造新船）。

③交船期。

④船价、币制和支付条件。

⑤监造人员职权。

⑥工程更改。

⑦试航、验收和交接船。

⑧有关交船期、载重量、船速和主机耗油率等达不到规定的罚款规定。

⑨财产保险和产权。

⑩厂方质量保证。

⑪人力不可抗拒因素。

⑫仲裁。

⑬合同的修改和转让等。

2.5.2 新造船的验收标准

（1）新建船舶应向船舶检验机构申请建造入级检验。图纸资料应按《钢质海船入级规则》的有关规定送交审查。

（2）建造中，监造人员和验船师应按《钢质海船建造规范》和船级社的有关规定进行验收。

（3）建造入级检验的要求

①钢材、焊接材料和拟装用的汽轮机、柴油机、锚机、舵机、锅炉、受压容器以及其它重要设备和材料应按船级社现行《船用产品检验规则》的规定向船级社申请检验，并取得船级社船用产品证书后方可装船。

②建造船舶应按批准的图纸施工，所使用的材料和工艺以及布置等应符合规范规定，并经验船师检验认可。

③对采用新颖设计或使用非常规材料的船体或轮机(包括电气设备)，可要求增加某些试验和（或）检验。

④如船舶推进机械和重要辅助机械能用遥控和（或）自动控制系统加以操纵时，这些控制工程设备应按《钢质海船建造规范》的有关规定进行布置、安装和试验。

⑤船舶在建造中和在建造完成时，船体构造、设备、机械、管系、电气设备等，应在验船师在场的情况下进行各种检查和试验。系泊试验和航行试验大纲，应经验船师同意。工厂的有关试验报告，应经执行检验的验船师签字。

2.5.3 监造工程师的职责

监造工程师一般均以船体、轮机和电气三方面专业人员组成。他们具有专业技术和经验，又熟悉船舶的营运和管理。从设计到施工安装，监造工程师的工作对船舶的良好使用、安全、检修方便和适航等有重要影响。

1）监造工程师应审批船厂修改的技术资料，保证船舶的设计不仅满足船检规范的要求，而且要满足合同规定的全部内容。

2）监造工程师应负责工程的监督和验收工作。

（1）监造工程师应了解船厂的生产组织情况，掌握工程进度，及时发现问题向船厂提出修改要求。

（2）在各个工程阶段，会同验船师对材料、结构、制造公差、工艺、性能等进行检验和验收。

（3）代表公司负责与船厂联系，处理建造中发生的问题，签署文件，办理结帐等事宜。

（4）指导船员的监造和接船工作。

2.5.4 船舶的保修和索赔

1）保修期

合同一般规定新船质量保证期为交接船后一年。某些设备和缺陷双方商谈后可能会再延长一段保证期。如因故船舶连续停止使用一个月以上，则保证期经双方商谈后也相应延长一个月。

2）保修的原则

（1）在保修期内凡非因人力不可抗拒和船员操作过失及正常磨损等所发生的缺陷和损坏都归船厂负责。

（2）由船方自供的设备如发生故障缺陷应由船方向供应厂商联系解决保修事务。

（3）船舶应及时按照规定格式填写保修工程索赔单，寄给公司。由船技处负责向船厂交涉保修或索赔。

（4）如有些缺陷和损坏必须调换备件的，则应作好记录和资料，以便索赔新的备件。

（5）船上有保修工程师时，对于涉及的保修事件就可列表请其签认作为见证，或请其在保修单上签字。

（6）需在抵港后进行修理的，应请验船师检验，并按验船师要求进行修理。

（7）保修岁修是和船厂交涉的最后保修机会。为维护公司和本船利益，应事先做好各种检查和准备工作。

2.5.5 交船和接船

新船基本建成后，在接船前还必须进行倾斜试验、系泊试验和出海试验，待全部完成并符合合同要求后，双方才进行新船交接工作。

1）新型船的第一艘船或属原船型但已有较大变动而影响稳性的船均需做倾斜试验。

2）系泊试验是为出海试航作准备，凡不是必须依赖于航行和主机全速运转的机械设备和自动化系统设备的试验和检验，均应在出海试验前尽量多地在系泊试验中完成。

3）出海试航主要是检验船舶的航行性能。试航中发现的一切缺陷都应逐条详细记录下来，由双方交接人员讨论，确定哪些缺陷必须在交接前由船厂负责消除并通过检验；哪些项目作为船厂的保修义务列入保修工程单；对于主机的某些机构，尚须决定拆检哪些部件。

4）当出海试航和各种检验都满足合同规定，以及各部门的属具物料全部送船后，双方就可按合同条款规定进行交接，并在交接议定书上签字。

5）船方一般可要求在出海试航到交接船期间安置一些船员在机舱跟班，以熟悉操作。

6）船方应在双方商定好的交接船日期之前作好投保手续，以使接船后的船舶保险顺利办妥。

7）双方代表签署交接船议定书以后，船方代表应即电告公司新船已于何日何时接船并开始投入营运。

3 船舶的入级和保险

3.1 船舶的入级

水运企业船技部门应掌握所属船舶技术证书的有效期限，督促船舶办理证书的签证、换发和展期，保持船舶各种证书的有效性。

3.1.1 针对不同船舶，按《钢质海船入级规则》规定，送审图纸资料，向船级社申请建造入级检验或初次入级检验。

3.1.2 已在船级社入级的船舶，为保持其已获得的船体级和轮机级，船技部门必须按规定安排修船，使船舶定期履行下列各种保持入级的检验：

（1）年度检验；

（2）坞内检验；

（3）锅炉检验；

（4）螺旋桨轴和尾轴检验；

（5）特别检验；

（6）循环检验；

（7）惰性气体系统检验（若有此设备）。

3.1.3 展期检验

船舶特别检验到期时，如因故不能按时提交特别检验，则可向验船机构申请展期并办理展期检验。

展期检验在一般情况下，船技处应安排和申请验船师对该船的船体、轮机（包括电气设备）进行一次具有足够范围的一般检验，如对检验结果合乎要求，验船机构将结合船舶最近一次坞内检验记录，给予一定时间的展期，但最多不超过12个月。

3.1.4 修理及改装检验

（1）船舶如涉及船体和设备或轮机（包括电气设备）保持入级的修理或更换，船技处应申请该局验船师检验。

（2）船舶如需要进行改装或改建，船技处应事先将有关的设计图纸资料提交船检机构审批。这些图纸资料应尽可能符合"建造规范"的要求。

（3）改装或改建工程应在验船师检验下进行；工程完成后，如验船师认为必要时，可按照新建要求进行试验。

3.1.5 临时检验

在下述情况下，船技处应向船检机构申请进行临时检验：

（1）更改船名、船籍港或船舶所有人时；

（2）遭受影响入级的海损或机损事故时；

（3）改变航区或用途时；

（4）准许推迟检验的项目或限期检验的项目，期限届满时；

（5）船舶封存后起用时。

3.1.6 货物冷藏装置的检验

1）建造入级检验

对具有货物冷藏装置的船舶，船技处应在向船检局申请办理船体级和轮机级建造入级检

验的同时，申请货物冷藏装置的建造入级检验，按规定送审图纸资料

2)初次入级检验

对于未在我国船检机构特别检验下建造的货物冷藏装置，船技处应提交该冷藏装置建造和改建的有关资料和文件，以及其他验船机构签发的货物冷藏装置入级证书和检验文件，向船检机构申请初次入级检验。

3)保持入级的检验

为保持货物冷藏装置的入级，应按规定申请年度检验和特别检验。

年度检验按货物冷藏装置入级证书中入级检验或特别检验签证日期每周年进行一次。

特别检验一般每隔四年进行一次。第一次和嗣后的特别检验日期，分别自建造入级检验或前一次特别检验完成之日算起，一般应不超过四年。

4)装货港检验

船舶运输冷藏货物时，船技处应向装货港的验船机构申请装货前的检验，以取得“装货港检验证书”。

“装货港检验证书”的有效期自检验完毕之日算起一般为 2 个月。在证书有效期内若装冷藏货，可不再申请装货港检验。

3.1.7 各轮的各种船舶证书、检验鉴定书和检验报告的副本，公司的船技部门应该存档保管。

3.2 船舶保险

3.2.1 按照保险期限的不同，船舶保险的类别分为航次保险和定期保险(期保)。航次保险是指船舶从装货到卸货港卸完货一个航次的保险；期保一般是保 12 个月。

3.2.2 保险金额

保险金额（保金）是保险人根据保险单对保险标的所受损失给予赔偿的最高数额，是全损赔偿的限度。保险金额不可能超过保险标的可保价值。

3.2.3 对保金的影响因素有下列各项：

(1)保险市场的竞争情况；

(2)船舶所有人的讲价能力；

(3)经纪人的讲价能力；

(4)投保船舶的可靠程度；

(5)船员水平和船公司的经营管理情况。

3.2.4 保险单

保险单是保险人已接受保险的正式凭证。在保险标的因自然灾害或意外事故遭受灭失或损害时，保险单是被保险人索赔的主要依据，也是保险人理赔的主要依据。

船舶保险单除载明保险人名称、保险标的名称、险别、起讫地点、保险期限、保险金额等项目外，并附有关保险人的责任范围以及保险人和被保险人的权利和义务等方面的详细条款。

3.2.5 保险单的签订

(1)在我国由船舶公司直接与中国人民保险公司签订船舶保险合同。

(2)国际上根据海上保险法，船舶所有人把保金给经纪人，经纪人再给保险公司，保险人就出一个保单。

3.2.6 中国人民保险公司船舶保险条款

船舶保险条款主要是规定了船舶保险的责任范围和除外责任。船舶承保的险别有全损险和综合险两种，险别不同保险公司的责任范围也不同。

1)全损险及其责任范围

我国远洋船舶一般投保全损险。船舶全损险的责任范围是由于下列原因造成被保险船舶的全部损失，保险公司负责赔偿：

(1)自然灾害或意外事故；

(2)船壳和船舶机件的潜在缺陷；

(3)船长、船员、引航员或修理人员的疏忽。

所谓全部损失，是指船舶由于上述原因引起的全部灭失。如造成船舶局部损坏，则称为部分损失。部分损失不包括在全损险的责任范围内，保险公司不予赔偿。

2)综合险及其责任范围

综合险的责任范围更大些，即除了上述三项原因造成的全部损失外，即使造成的损失是部分损失，保险公司也负责赔偿，部分损失的赔偿以航程为单位，并扣除保险单内规定的免赔额后计算。此外，由于上述三项原因而引起的下列责任和费用，保险公司也负责赔偿。

(1)共同海损分摊

(2)碰撞责任

(3)救助费用

(4)向第三者追偿的费用

3)船舶保险的除外责任

船舶投保后，对保险公司不予赔付的损失称为除外责任。列入除外责任的有：

(1)由于被保险船舶开航时不具备适航条件所致的损失；

(2)由于船东及其代表的疏忽，船东及其代表和船长的故意行为造成的损失；

(3)船舶的正常维修、油漆船壳费用和本身磨损或锈蚀；

(4)滞期损失和间接费用；

(5)清理航道的费用；

(6)由于战争所致的损失。

4)几项特殊规定

(1)免赔额

船舶保险一般都有免赔额的规定。免赔额一般为保金的3%或约定值。国际上通常规定，如某航次中损失达到免赔额，即可获得全部保险赔偿，如不到免赔额，则不予赔偿，以减少零星赔款之繁琐。

根据“人保”保险条款规定，由于触礁、搁浅造成的船舶部分损失均应按每一航次扣除保险单规定的免赔额。这是为了减少船方和保险人之间处理与赔款的一种手段。

(2)航行区域

是一种附加的保赔责任险。

(3)船舶战争险

也是一种附加的保赔责任险。

(4)船舶油污责任险

是一种特殊附加险。我国远洋公司油轮按我人民保险公司“油污及其他保赔责任险”条

款投保油污险。根据条款规定，人保公司对被保险人支付由于船舶在装卸、运输过程中或操作人员的过失造成被保险船舶油或其混和物污染港区、海域，被保险人或有关当局清除漏油或其他油性混合物而支出的合理费用以及第三者的污染损害被保险人支付的赔偿负责，但保险公司对每一事故的最高赔偿限额为3000万美元。中远公司部分油轮的船舶油污险是向英国西英保赔协会投保的。

船舶油污责任险的保险期最长为一年。

3.2.7　船舶保险的保单不可转让

船舶所有人如果变动，船舶保险则自动停止。所以船舶买卖以后，应重新投保。

3.2.8　续保

如果一份保单到期的时候，被保的船舶还在海上、在遇难中、在避难港或在中途港，且船东已向保险公司讲明情况要求续保，那末保险公司应继续保下去，直至完成该航次为止。保险费每月按原规定收取。

3.2.9　退费

如果被保的船舶在码头停泊超过30天，则可按比例退给被保人一部分保金。

4　全面质量管理

4.1　交通运输企业的产品质量

运输企业的产品就是客、货空间位置的转移，它的产品质量特性是安全、及时、完整、经济、便利和文明服务等。

1)安全性

安全是运输的第一质量特性，因此交通运输部门也把全面质量管理称为全面安全质量管理，以贯彻“安全质量第一”的方针。客、货运输的安全质量用旅客安全运输率和货运损失赔偿金额率来考核。

2)及时性

指运输速度，其考核指标为运输期限超期率和运输期限合格率。

3)完整性

指从承运到运输终了要确保货物数量不差，物理和化学性质不变；对客运要强调旅客在旅途中的身心健康。完整性用货损率和货差率考核。

4)经济性

企业的经济效益包括社会经济效益和企业本身的经济效益两个方面。对投资和经营管理的考核指标有投资的内部收益率、必要运费率、人均利润率、船吨产量和千吨海里燃料消耗等等。

5)服务性

这是运输质量特性的综合表现。服务性并不只限于客运，要做好全面的客、货运服务工作。

4.2　交通运输企业的质量保证体系

全面质量管理是指根据提高产品质量的要求，有利于充分发动全体职工，综合运用现代科学和管理技术的成果，实现对生产全过程各因素的有效控制，达到提高质量，降低消耗，

提高经济效益的一整套科学管理方法。它有以下四个特点：

（1）管理的质量是全面的——不仅要管运输质量，还要管赖以形成运输质量的工作质量，即企业领导和各部门的工作水平、职责条例、工作质量标准等等。

（2）管理的范围是全面的——将管理工作贯彻到运输生产的全过程的各个环节，变事后检查为事先控制，将预防和检查结合起来，以预防为主。

（3）参加管理的人员是全面的——从企业领导到工人，从企业总部到各部门和船舶，人人参加质量管理工作。

（4）用以管理的方法是全面的——综合运用组织管理、统计方法和专业技术来反映和解决质量问题。

推行全面质量管理必须做好基础工作，其中最直接的有：标准化（主要是管理业务标准化）、计量工作、质量情报工作、质量教育工作和质量责任制等。

为了达到规定的质量要求和保证质量能够稳步提高，在企业中必须建立一套与质量技术和质量管理直接有关的质量保证体系。

质量保证体系的基本内容包括：

（1）要有一个保证质量的管理业务流程，这是建立质量保证体系的基础。

（2）要有明确的组织机构和职责分工。

（3）要有为实现方针目标而制订的各类标准，包括设备技术标准、工作管理标准、工作标准、安全操作标准和岗位作业标准等。

（4）要有一个畅通的信息传递和反馈系统。

（5）要有质量保证活动的评价。

（6）建立必要的会议制度，如日调度会议、旬计划会议、月计划平衡会议和质量分析例会等。

质量保证体系是通过“计划——实施——检查——处理”这一质量管理循环（PDCA）来推动运转的。具体可分为八个步骤：

（1）分析状况，找出存在的质量问题；

（2）分析产生质量问题的原因；

（3）找出影响质量的主要因素；

（4）采取措施、制定计划和预计效果。

（5）实施计划、分工安排。

（6）检查执行结果。

（7）总结经验，巩固成绩；

（8）提出这一循环尚未解决的问题，转入下一循环。

4.3 全面质量管理的组织形式

虽然推行全面质量管理是企业全体成员的事，但是没有一个专职机构，工作就会落空。这个质量管理机构必须是在企业主要负责人的直接领导下，由具有一定经验和管理才能的业务骨干组成，它的职责是：

（1）负责组织企业全面质量计划的编制；

（2）负责组织对企业运输质量和各部门工作质量的综合评价；

（3）负责组织和督促有关部门对运输质量意见的征集和调查；

（4）负责开展全面质量管理的教育和宣传;
（5）负责对各基层的质量管理活动的指导和考核;
（6）质量管理工作的奖惩;
（7）建立质量档案和质量信息系统。
各级部门都要建立相应的质量管理组织，全面质量管理的最基层组织是质量管理小组。
凡在生产或工作岗位上从事各种劳动的职工，围绕企业的方针目标，运用质量管理的理论和方法，以改进质量(产品、运输、工程、服务)，提高经济效益为目的，组织起来开展活动的小组，可统称为质量管理小组。视企业实际情况，它可以:
①按现有生产班组建立;
②按生产过程的质量关键问题或薄弱环节，跨班组、跨部门或甚至跨单位组成。

5 可靠性管理

可靠性已成为现在工业产品的重要质量指标。为了设备可靠，同质量管理一样，必须将可靠性管理贯彻到从设计、试验、制造、出厂检验和实际使用等各个阶段。可靠性管理要保证设备在整个使用期间的技术性能，即所谓长期质量，而质量管理只着眼于质量满足出厂标准。因此，可靠性管理随行业不同有很大差异。

5.1 可靠性、维修性和有效性

5.1.1 可靠性

可靠性的定义是“在给定的条件下和规定的时间内，元部件、设备或系统能完成规定功能的概率。”若规定的时间为 t，设备从开始工作到发生故障（失效）的连续正常工作时间为 T，则该设备的可靠性特性指标为:

（1）可靠度

$$R(t)=P(T>t) \quad t\geq 0, \quad 0\leq R(t)\leq 1 \tag{1.3.2-14}$$

（2）不可靠度（故障分布函数）

$$F(t)=1-R(t) \tag{1.3.2-15}$$

（3）故障密度函数

即任一时刻发生故障的概率的变化程度

$$f(t)=\frac{dF(t)}{dt} \tag{1.3.2-16}$$

（4）故障率

指任一时刻发生故障的概率

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)} \tag{1.3.2-17}$$

（5）平均故障间隔（$MTBF$）

$$MTBF=\int_{-\infty}^{\infty}tf(t)\,dt \tag{1.3.2-18}$$

常见概率分布类型的可靠性指标示于表 1.3.2-8。

在可靠性试验时，也可用统计方法计算上述指标。若有 n台设备同时开始工作，可将整个试验时间划分为若干个观察时区 Δt，记下每个时区（t_{i-1},t_i）中发生故障的设备数 r_i，则在第 i 时间结束时仍可靠工作的台数为

$$n_i = n - \sum_{j=1}^{i} r_j \qquad (1.3.2\text{-}19)$$

由此推算出第 i 时区的可靠性指标

$$f(t_i) = \frac{r_i}{n}\frac{1}{\Delta t} \qquad (1.3.2\text{-}20)$$

表 1.3.2-8　　几种常见分布的可靠性指标计算

分布 指标	指数分布	正态分布	威布尔分布	对数正态分布	伽玛分布
可靠度 $R(t)$	$e^{-\lambda t}$	$1-\Phi(\frac{t-\mu}{\sigma})$	$e^{-(\frac{t}{\eta})^m}$	$1-\Phi(\frac{lnt-\mu}{\sigma})$	$\sum_{i=0}^{k-1}\frac{(\lambda t)^i}{i!}e^{-\lambda t}$
故障密度 $f(t)$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\mu)2}{2\sigma^2}}$	$\frac{m}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{m-1}e^{-(\frac{t}{\eta})^m}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t}e^{-\frac{(lnt-\mu)2}{2\sigma 2}}$	$\frac{\lambda^k}{\Gamma(k)}t^{k-1}e^{-\lambda t}$
故障率 $\lambda(t)$	λ	$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\mu)2}{2\sigma^2}}}{1-\Phi(\frac{t-\mu}{\sigma})}$	$\frac{m}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{m-1}$	$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t}e^{-\frac{(lnt-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{1-\Phi(\frac{lnt-\mu}{\sigma})}$	$\frac{t^{k-1}e^{-\lambda t}}{\int_0^\infty t^{k-1}e^{-\lambda t}dt}$
平均寿命 $E(t)$	$\frac{1}{\lambda}$	μ	$\eta\Gamma(1+\frac{1}{m})$	$e^{\mu+0.5\sigma^2}$	$\frac{k}{\lambda}$
寿命方差 $D(T)$	$\frac{1}{\lambda^2}$	σ^2	$\eta^2[\Gamma(1+\frac{2}{m})-\Gamma^2(1+\frac{1}{m})]$	$e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2}-1)$	$\frac{k}{\lambda^2}$

$$F(t_i) = \sum_{j=1}^{i} f(t_i)\Delta t = \frac{\sum_{j=1}^{i} r_i}{n} = 1 - \frac{n_i}{n} \qquad (1.3.2\text{-}21)$$

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = \frac{n_i}{n} \qquad (1.3.2\text{-}22)$$

$$\lambda(t_{i-1}, t_i) = \frac{f(t_i)}{R(t_{i-1})} = \frac{r_i}{n_{i-1}}\frac{1}{\Delta t} \qquad (1.3.2\text{-}23)$$

表 1.3.2-9 为一次可靠性试验记录和指标计算，参加试验设备数 $n=70$，总试验时间为 90 小时，观察时区 $\Delta t=10$小时。计算结果曲线示于图 1.3.2-6

表 1.3.2-9　　可靠性试验记录计算

观察序号 i	总观察时间 t_i	工作设备数 n_i	区间失效数 r_i	总失效设备数 Σr_i	区间故障密度函数%/h $f(t_i)$	不可靠度 % $F(t_i)$	可靠度 % $R(t_i)$	故障率 %/h $\lambda(t_{i-1},t_i)$
0	0	70	—	—	—	0	100	—
1	10	70	0	0	0	0	100	0
2	20	70	0	0	0	0	100	0
3	30	68	2	2	0.29	2.9	97.1	0.29
4	40	57	11	13	1.57	18.6	81.4	1.62
5	50	41	16	29	2.28	41.5	58.5	2.80
6	60	21	20	49	2.86	70.0	30.0	4.88
7	70	7	14	63	2.00	90.0	10.0	6.66
8	80	1	6	69	0.80	98.5	1.5	8.58
9	90	0	1	70	0.14	100	0	10.00

5.1.2　维修性

维修性表示设备维修的难易程度，对可修复设备，良好的维修性可弥补其可靠性的不足。维修性由维修度来衡量，它被定义为“按照预定的程序维修，在规定的时间内，设备能恢复

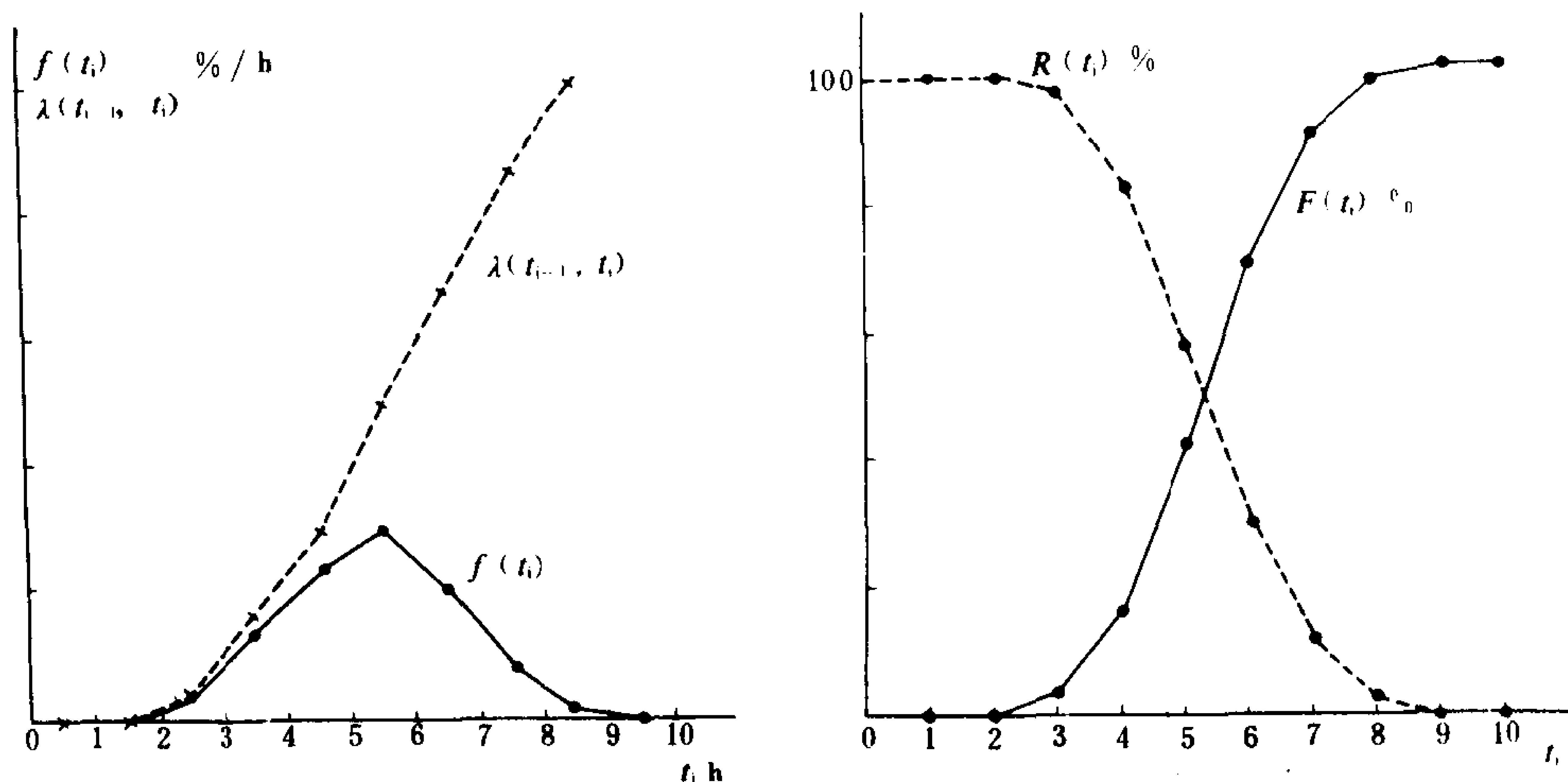


图 1.3.2-6 可靠性指标曲线

其规定功能的概率”。常用的维修性指标有：

维修度 $M(t)=P(T>t)$ (1.3.2-24)

分布函数 $1-M(t)$ (1.3.2-25)

密度函数 $m(t)=\dfrac{dM(t)}{dt}$ (1.3.2-26)

修复率 $\mu(t)=\dfrac{m(t)}{1-M(t)}$ (1.3.2-27)

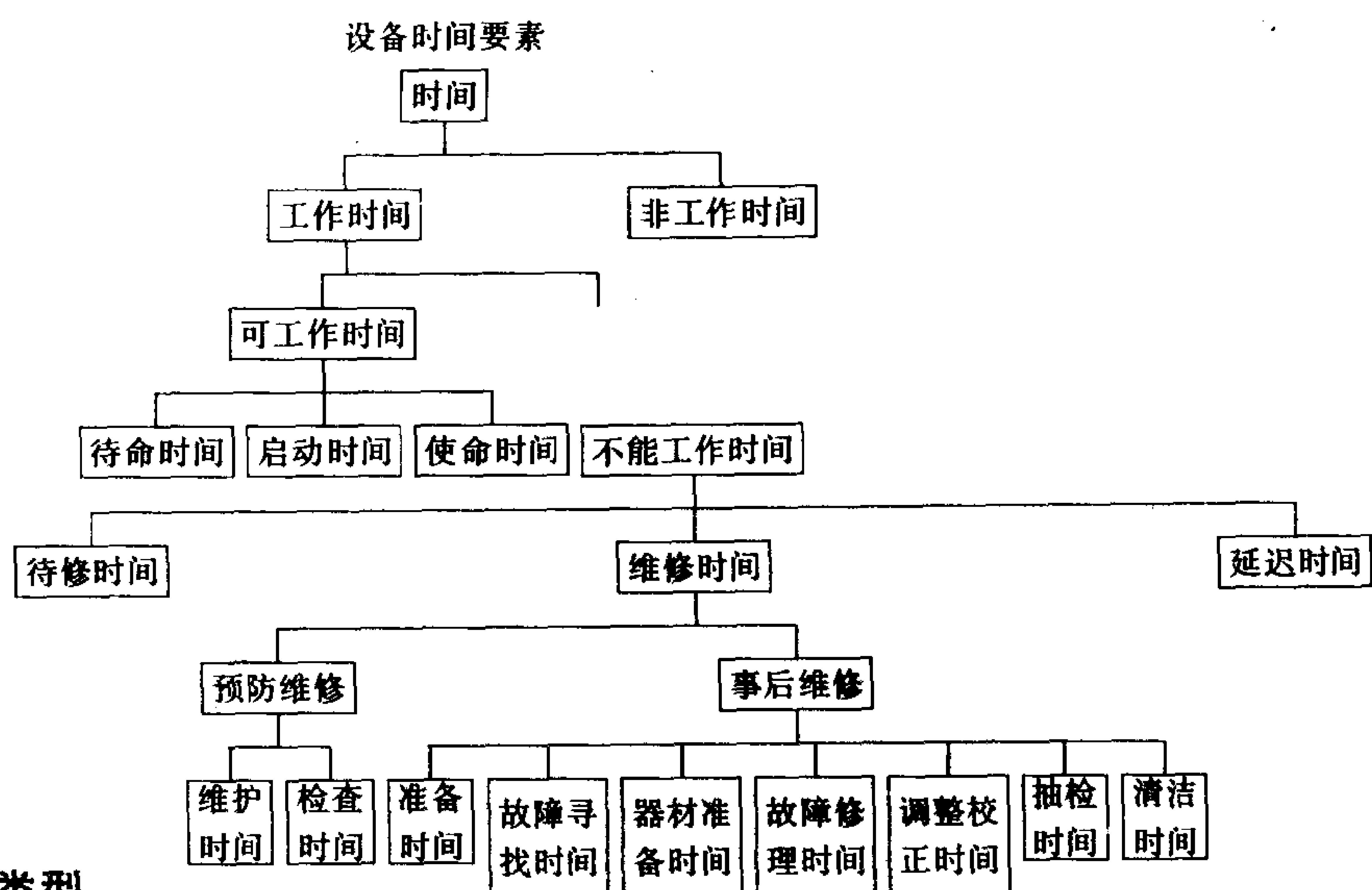
平均维修时间 $MTTR=\dfrac{1}{\mu}$ （对指数分布） (1.3.2-28)

5.1.3 有效性（可用性）

设备是否随时有效由有效度表示，其定义为“系统（设备）在规定的条件下使用时，在任意时刻保持其规定功能的概率”。对可修复系统的有效度与可靠度和维修度有关，对不可修复系统则不受维修度的影响。常用的各种有效度指标列于表 1.3.2-10。

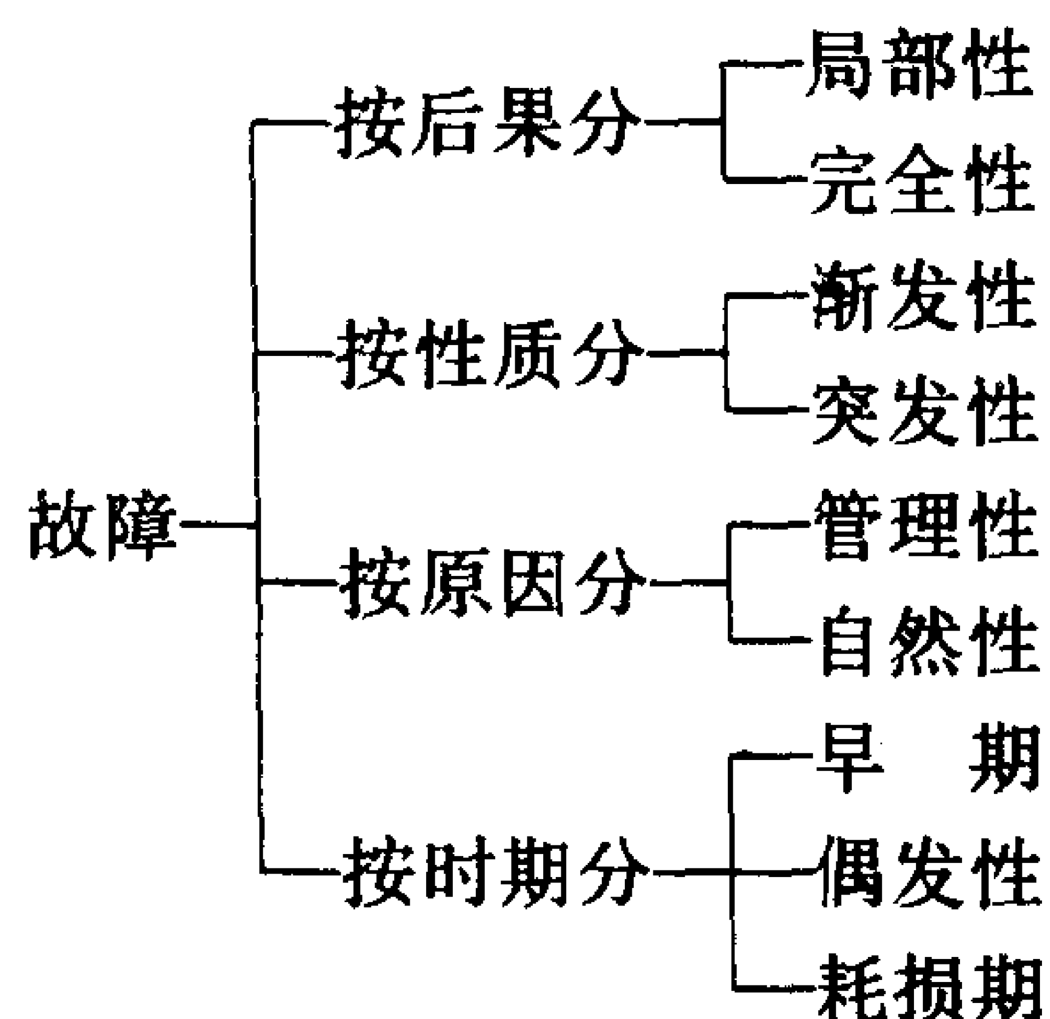
表 1.3.2-10 常用的有效度

有效度	计算方法	说明
稳态有效度（工作时间比）	$A=\dfrac{\text{可工作时间}}{\text{可工作时间}+\text{不能工作时间}}$	研究在长时间使用中的有效度
固有有效度	$A_i=\dfrac{\text{可工作时间}}{\text{可工作时间}+\text{维修时间}}$	这是设计赋予设备的有效度
使用有效度	$A_u=\dfrac{\text{可工作时间}+\text{非工作时间}}{\text{可工作时间}+\text{非工作时间}+\text{不能工作时间}}$	这是除改装时间外的有效度
维修系数	$\rho=\dfrac{\text{维修时间}}{\text{可工作时间}}$	$A_i=\dfrac{1}{1+\rho}$
设备有效度	在故障间隔时间和修复时间都服从指数分布时 $A_E=1-e^{-\mu\tau}(1-e^{-\lambda T})$	λ——故障率 T——要求设备的工作时间 τ——允许维修时间 这是允许停下来维修时的有效度
任务有效度	$A_u=e^{-\lambda Te-\mu\tau}$	若故障在 τ 时间内可修复，能完成时间为 T 的任务的概率



5.2 故障类型

设备（部件或系统）丧失规定功能，对可修复者称故障，不可修者为失效。



设备发生故障的概率用故障率$\lambda(t)$表示，各类设备的故障率类型不同，可归纳为递减型、恒定型和递增型三类，它们的性质示于表 1.3.2-11。

表 1.3.2-11　　**故障率性质**

类型	故障率曲线	可靠度曲线	故障密度曲线	特　征	维修效果
递减型	$\lambda(t)$ t	$R(t)$ t	$f(t)$ t	多见于合格品和次品混在一起的情况，如电子元件，机械产品的磨合期	不进行预防维修。筛选很有效
恒定型	$\lambda(t)$ t	$R(t)$ t	$f(t)$ t	由于随机应力致使故障随机发生，如设备的正常工作时期，复杂的电子设备	预防维修不起作用

续上表

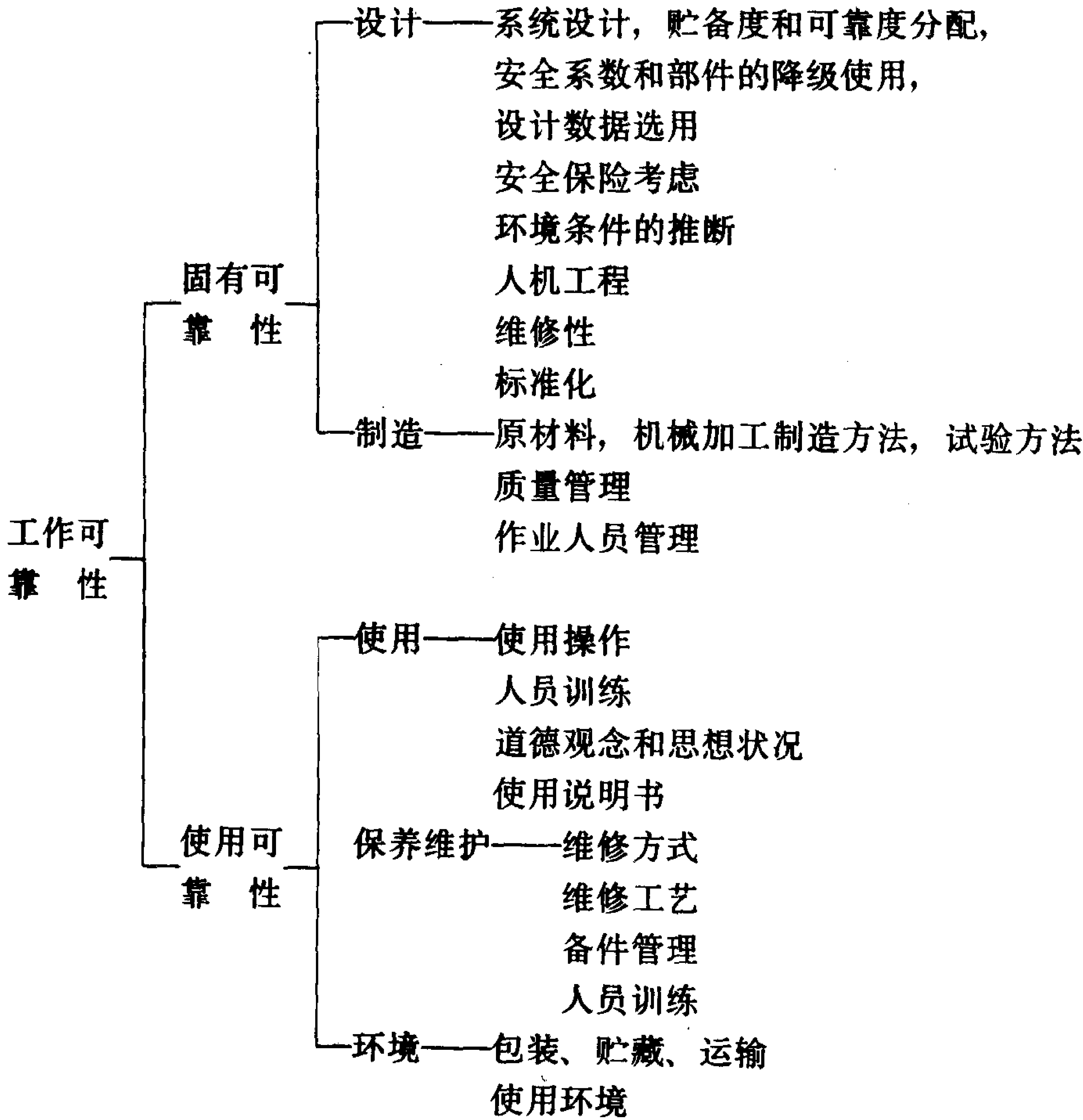
类型	故障率曲线	可靠度曲线	故障密度曲线	特　征	维修效果
递增型	$\lambda(t)$, t	$R(t)$, t	$f(t)$, t	由于磨损、老化等致使寿命终止，故障集中发生。	在故障频频发生前进行零、部件更换是有效的

5.3 工作可靠性和可靠性试验

设备在实际使用时的可靠度称为工作可靠度。

工作可靠度＝设备固有可靠度×使用可靠度

一般说来，设计时已决定了设备固有可靠度，制造时要尽可能达到设计规定的可靠度，是否可靠只有在使用中才表现出来。下面列出对工作可靠性有影响的诸因素



因此，对使用部门，除了在使用维护方面做好工作之外，应积极参与设备生产厂家的设计，并对制造、试验予以监督。

为提高可靠性而进行的试验称为可靠性试验。在试验时必须很好地模拟实际使用条件，否则试验将无意义，另外，正确的试验设备抽样也要得到保证。

可按照设备将来的使用维修情况来选定可靠性试验指标，如表 1.3.2-12 所示。

表 1.3.2-12　　可靠性试验特性指标

使用方式	维修可能性	维修方式	可靠性指标	设备举例
连续使用的设备	可修理	预防维修	*MTBF* 耐用寿命 有效度 维修度	大型系统 电子计算机 车辆 生产设备
		事后维修	*MTBF* 耐用寿命	机械设备
	不可修	用坏为止	平均寿命 寿命偏差 （方差，均方差）	消耗性物品，如灯泡，只能事后保养的机器零件
		使用一定时间后就报废的设备	故障率 *MTTF*	有预防维修的机器的零件，其平均寿命实际上比实际使用寿命长
一次使用或间断使用的产品	可修理	预防维修	成功率 不动作率 错误动作率	过载继电器 救生器具等
	不可修			保险丝

按试验的目的和指标选用不同的试验方法，各种可靠性试验如下：

（1）按试验场所分——现场试验（检测工作可靠度和使用可靠度），模拟试验（检测固有可靠度）。

（2）按应力强度分——正常工作试验，超负荷试验，破坏性试验，极限试验，加速寿命试验，强制耗损试验。

（3）按应力施加时间分——恒定应力试验，加各种负荷试验，递增应力试验，周期应力试验，间歇工作试验，无负荷存放试验。

（4）按可靠性计划阶段分——设计验证试验，鉴定试验，接收试验，工作试验。

（5）按抽样方法分——整体试验，一次抽样试验，多次抽样试验，序贯抽样试验。

（6）按试验终止分——定时截尾试验，定数截尾试验。

6　机务管理信息系统

6.1　管理信息系统功能

凡用必要的方法，从本企业和外部环境中收集管理信息，加以处理，并按照各管理阶层的要求形成表格、文件、报告和统计数字或图表等，以便向管理人员提供信息的系统称为管理信息系统。

管理信息可分为战略计划信息、管理控制信息和业务信息三类。电子计算机是现代企业管理中的信息处理主要工具，但在一定范围内，只要组织得好，没有计算机也能构成信息系统。

信息系统的基本功能是：

(1)信息收集——随机收集、定期收集和询问收集，并将信息变成数据资料。

(2)信息传输

(3)信息处理

①把初始信息变换成便于观察、传递、分析或进一步处理的形式；

②筛选分类，去除无用信息。

③编辑整理，压缩数量，提高质量。

④分析计算，作为了解营运状况和干预当前营运的判断依据。

⑤将一些当前暂不用或不可用的信息贮存起来，作为事后分析的资料。

管理信息系统的主要任务是：

(1)为管理和决策过程准备和提供统一的信息，排除使用前后矛盾的不完整数据。

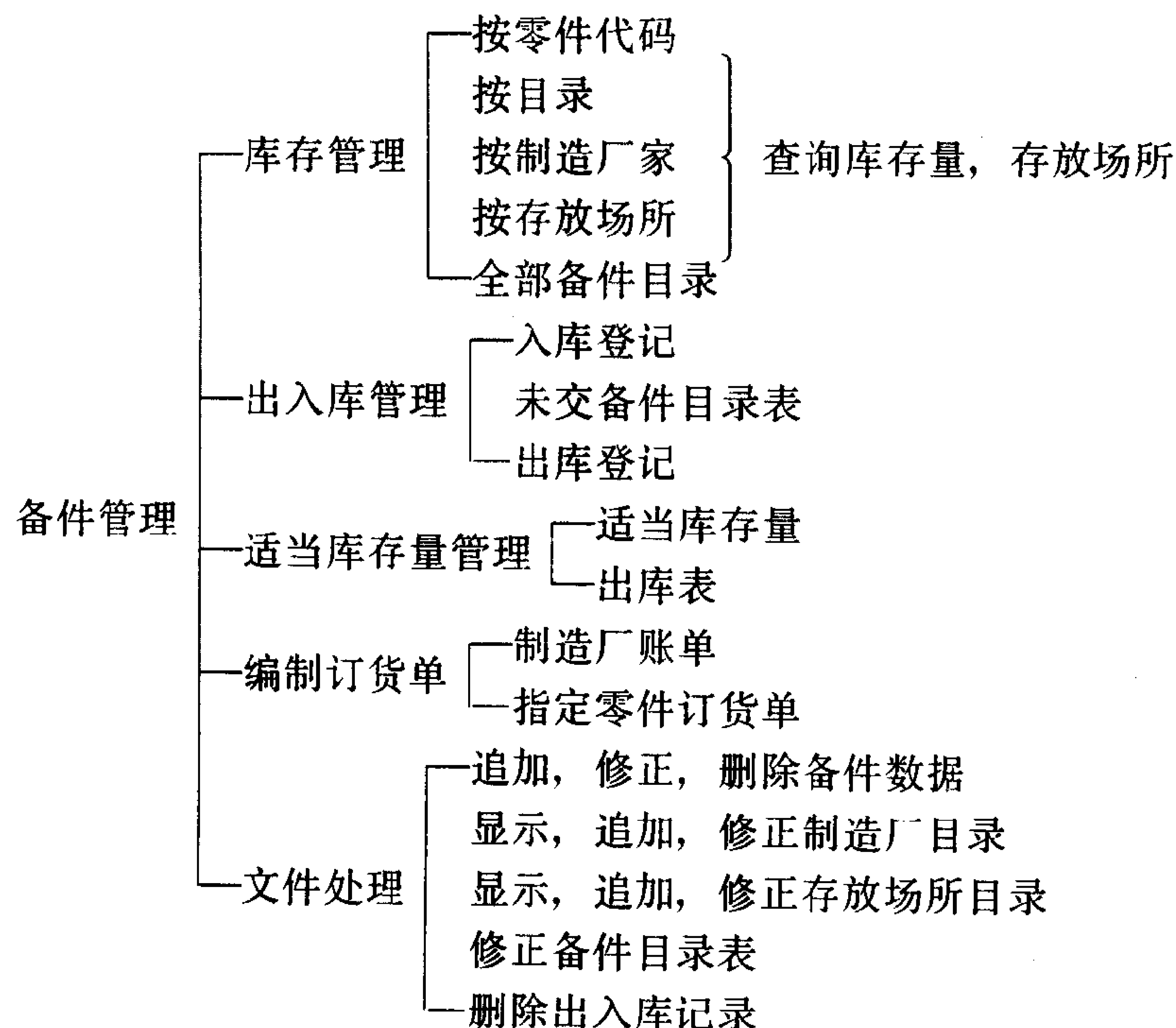
(2)利用指定的数据关系或数学模型来分析数据，用以评审过去和预测未来。

(3)向各级管理机构提供详细程度不同的报告，缩短各部门用于分析和解释的时间。

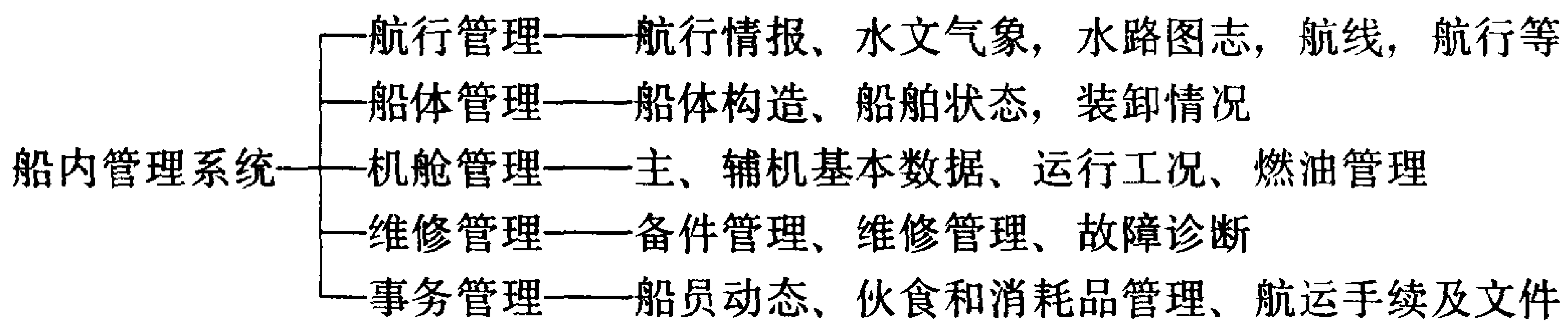
6.2 机务管理信息系统

机务管理信息系统是航运企业管理信息系统的一个重要部分，按其功能也划分为许多职能子系统，诸如船舶技术资料，船舶修造，燃、润、物料统计与管理，备件管理，船舶检验和证书管理和文件处理等等。

下面示以备件管理子系统之一例。



随着计算机和通讯卫星的发展，船舶管理信息系统也将从独立的部门管理过渡到由航运企业信息计算中心统一管理。下面为正在着手开发的船内计算机管理系统，以通过国际海事通讯卫星将各船的主要信息传输至陆上基地，在船内的工作仅为航行监视，其它管理工作均移至陆上集中进行。



参考文献

〔1〕王延起编著：企业管理手册，内蒙古人民出版社，1984年
〔2〕藤田董（日）等：管理技术讲座，中国农业机械出版社，1983年
〔3〕曾秋成编著：技术数理统计方法，安徽科学技术出版社，1983年
〔4〕孙荣兴、林德全编著：交通运输企业全面质量管理基础，人民交通出版社，1983年
〔5〕盐见弘（日）：可靠性工程基础，科学出版社，1983年
〔6〕日本规格协会可靠性实施分会编：可靠性指南，天津科学出版社，1984年

第 3 章　船舶营运经济管理

1　工程经济分析

工程经济分析是投资决策的重要依据，它是从单纯的经济观点出发，以货币价值为评价的基础，通过合理的比较，从两个以上的工程投资方案中选择出一种最经济的决策。

投资决策方法分静态法和动态法两类，由于动态法考虑了资金的时间价值，显得更为合理，是当今用得较多的方法。

1.1　静态分析法

1.1.1　投资回收期

指工程项目的投资由该项目投产后的每年收益来偿还的年限。

$$投资回收期=\frac{项目的总投资}{投产后的年收益}\ 年$$

$$投资收益率=\frac{1}{投资回收期}$$

按投资工程项目的类别，一般投资回收期应不超过 3 ～ 7 年，投资收益率不小于0.15～0.3。

在比较两方案时，如一个投资K_1大，而年营运成本C_1低；另一个投资K_2小，营运成本C_2高，则可用追加投资回收期T这一综合指标。

$$追加投资回收期\quad T=\frac{K_1-K_2}{C_2-C_1}年 \tag{1.3.3-1}$$

$$投资效果系数\quad E=\frac{C_2-C_1}{K_1-K_2} \tag{1.3.3-2}$$

若T小于国家或主管部门所规定的标准定额，则投资大的方案是合理的；反之，应取投资较低的方案。

1.1.2　折算费用法

这是用定额投资回收期T_o或定额投资效果系数E_o，将诸比较方案的投资K和年度成本C折算成可比的折算费用D，折算费用最低的为最优方案。

$$D=C+E_oK \tag{1.3.3-3}$$

或

$$D=K+T_oC \tag{1.3.3-4}$$

1.2　资金的时间价值

资金的时间价值指资金的价值随使用时间而变化。因此，不同时间的相等资金量是不等价的，资金的使用应该是有偿的，如利息、利润、报酬和内部收益等。

最明显的资金时间价值就是利息，分单利和复利两种，广泛采用复利计算。

复利计算以年利率和计息周期为依据。例如 6 %利率表示年利率是 6 %，计息周期为一年。“6 %的半年复利”表明计息周期为半年，每半年周期结束时支付 3 %的利息，并在下一个半年周期中将这部分利息计入本金。

1.2.1 现金流程图

这是用线图来表示整个投资过程中现金的收支情况（图 1.3.3-1）。图的中横线标出时间标度，以计息周期为标度单位。用纵向箭头线段的长度表示现金金额数，向下表示支出，向上表示收入。

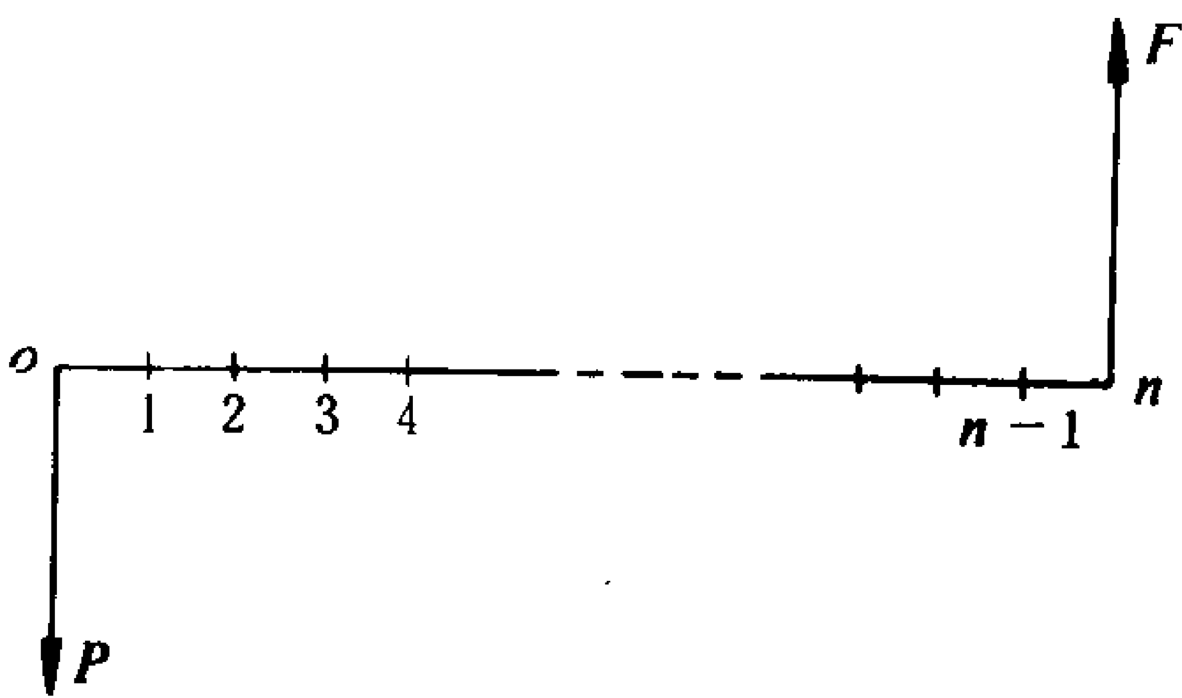


图 1.3.3-1 现金流程图

1.2.2 等值折算

对于使用时间不同的现金，需要计及时间价值加以等值折算，成为同一时间的相当价值后，才能相互比较。表 1.3.3-1 列出不同现金流程中常用的等值折算系数。折算时使用的术语和符号如下：

表 1.3.3-1 **复利计算折算系数**

支付方式	折算系数	代号	函数式符号	已知	求	计算公式	现金流程图
一次支付	一次支付复利系数	SPCA	$(F/P, i, n)$	P	F	$F=P(1+i)^n$ $=P(SPCA)$ $=P(F/P, i, n)$	F；o；1 2；n−1；n；P
	一次支付现值系数	SPPW	$(P/F, i, n)$	F	P	$P=F\frac{1}{(1+i)^n}$ $=F(SPPW)$ $=F(P/F, i, n)$	
等额多次支付	等额序列复利系数	USCA	$(F/A, i, n)$	A	F	$F=A[\frac{(1+i)^n-1}{i}]$ $=A(USCA)$ $=A(F/A, i, n)$	F；o；n；A A A A A A A
	偿债基金系数	SFD	$(A/F, i, n)$	F	A	$A=F[\frac{i}{(1+i)^n-1}]$ $=A(SFD)$ $=F(A/F, i, n)$	
	资本恢复系数	CR	$(A/P, i, n)$	P	A	$A=P[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}]$ $=P(CR)$ $=P(A/P, i, n)$	A A A A A A A；o；n；P
	等额序列现值系数	USPW	$(P/A, i, n)$	A	P	$P=A[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}]$ $=A(USPW)$ $=A(P/A, i, n)$	

续上表

支付方式	折算系数	代号	函数式符号	已知	求	计算公式	现金流程图
	等差序列系数	AS	$(A/G, i, n)$	G	A	$A=G[\frac{1}{i}-\frac{n}{(1+i)^n-1}]$ $=G(AS)$ $=G(A/G, i, n)$	
等差多次支付	等差序列现值系数	ASPW	$(P/G, i, n)$	G	P	$P=\frac{G}{i}[\frac{(1+i)^n-1}{i}-n]$ $[\frac{1}{(1+i)^n}]$ $=G(ASPW)$ $=G(P/G, i, n)$	
	等差序列复利系数	ASCA	$(F/G, i, n)$	G	F	$F=\frac{G}{i}[\frac{(1+i)^n-1}{i}-n]$ $=G(ASCA)$ $=G(F/G, i, n)$	

（1）现值P：表示货币在比较基准时间（现在）的金额。它出现在流程图的零点时标上或在选定的某基准时间上。可用以代表投资量、本金或未来金额的现值。

（2）未来值F：表示经过几个计息周期后的某一指定日期时的货币金额。

（3）等额年金A：在连续的计息周期序列中每期末的等额支付货币金额。

（4）利率i：每一计息周期结束时获取的利率。在广义上可表示收益率、报酬率或利润率等。

（5）计息期数n：折算时间过程的计息周期数。

（6）等差递增年金G：在连续的计息周期序列中每期末按等差梯度递增支付的金额梯度。

1.3 动态分析基本方法

1.3.1 净现值法

这是一种常用的投资效果计算，计算步骤如下：

(1)按企业追求的投资效果选定一个目标收益率。此收益率应大于投资贷款利率，一般以高于5%为宜。

(2)按目标收益率将投资工程使用年限内各年所发生的现金收入（+）和支出（-）均折算成投资开始年的现值，并计算它们的合计数P。

(3)将合计数P减去投资（一次或多次）的现值K，得净现值NPW

$$NPW=P-K \tag{1.3.3-5}$$

(4)如$NPW\geq 0$，表示投资达到预期效果；若$NPW<0$，则方案不可行，有待改进或放弃。

1.3.2 内部收益率法

又称贴现法。其步骤为：

(1)选定一个目标收益率，方法同净现值法。

(2)计算在工程使用期内的现金收支的现值与投资的现值相等时的内部收益率，也就是当净现值$NPW=0$时的收益率

(3)若求得的内部收益率大于或等于目标收益率，则工程投资方案可行，反之为不可行。

求内部收益率要计算n次多项式，所以多用试凑法或图解法求解。

1.3.3 等年值法

此方法多用于同一工程项目的各种投资方案比较。它是将每个方案的投资和工程使用期内的生产成本支出，按发生时间折算为等额年金后相加，得到年平均成本EUAC。再比较各方案的EUAC，小者为优。如两方案的投资量相等，则将各方案在使用期内发生的收入，按发生时间折算为年平均收益EUAB，EUAB最大者为优。

若各方案的投资量与生产量均不相等时，则分别计算各自的EUAB和EUAC，（EUAB—EUAC）大者为优选方案。

例　为进行节能改造需添置设备，现有三个方案可供选择，使用期皆为10年，目标收益率为8%。

已知数据	代号	方案A	方案B	方案C	
设备初投资	K	15000	25000	33000	(元)
投产后年节约燃料和劳务费用	B	14000	9000	14000	
年运行支出	C	8000	6000	6000	
10年后设备残值	S	1500	2500	3300	

①计算EUAB

	方案A	方案B	方案C	不添置
B	14000	9000	14000	0
S（A/F，8%，10）	104	172	228	0
EUAB=	14104	9172	14228	0

②计算EUAC

K（A/P，8%，10）	2235	3725	4917	0
C	8000	6000	6000	0
	EUAC＝10235	9725	10917	0
③EUAB－EUAC＝	3869	－553	3311	0

由此可知，各方案优劣次序为方案A，方案C，不添置和方案B。

1.4 折旧

企业的固定资产在营运生产过程中由于发生磨损而引起价值的降低，称为折旧。为了积累资金，对已磨损的固定资产进行大修理和更新，必须按期将其磨损计入生产成本。用货币形式计入生产成本中的价值，称为折旧费。由此从生产成本中提存的资金，称为折旧基金。

我国现对固定资产折旧采用直线折旧法，将固定资产折旧分为基本折旧和大修理折旧两种。

$$年折旧费=年基本折旧费+年大修理折旧费$$

$$年基本折旧费=\frac{固定资产原值+拆除费-预计残值}{预计使用年限}$$

$$年大修理折旧费=\frac{使用年限内大修理费总和}{预计使用年限}$$

$$年折旧率=\frac{年折旧费}{原值}\times 100\%$$

实际工作中，固定资产的折旧费按折旧率来计算，有个别折旧率、分类折旧率和综合折旧率三种。个别折旧率是按每一固定资产分别计算的，只适用于固定资产较少的企业。分类折旧率是以固定资产类别而定，我国规定水运企业分船舶、装卸机械、房屋建筑和其它四类制定。综合折旧率是整个企业或部门的平均折旧率，用于计划工作。

分类和综合折旧率直接关系到生产成本、企业利润和税收计算，因此是由国家财政部门和企业主管部门规定的。

船舶以外的固定资产的大修理费用，采用折旧形式计入成本，分期提存。中、小修理发生的费用则直接计入当期运输成本。水运企业的船舶将检修、小修及航修的修理费合并，以修理基金分期提存方式，计入成本。

折旧率与使用年限直接有关，使用年限决定于有形磨损和无形损耗两个方面，由于现在生产设备的更新换代周期逐渐缩短，世界各国的平均折旧率逐步提高，如船舶折旧年限已降至20～25年，并有进一步降至10～15年的趋势。对于无形损耗特大的设备，如电子产品，为了能在其使用年限中尽早收回大部分折旧费，常采用以下折旧法：

（1）余额递减法：或称定率减值法。除了第一年用固定资产原值乘以按下式计算的年折旧率得出的第一年折旧费外，

$$年折旧率=1-\sqrt[使用年限]{\frac{残值-拆除费}{资产原值}}$$

以后各年都按原值扣去已提折旧的净值（账面价值）乘以折旧率来计算年折旧额。

另一种为双倍余额递减法（DRDB），其每年提存的折旧费为

$$第t年折旧费=\left(\frac{2\times 原值}{使用年限}\right)\left(1-\frac{2}{使用年限}\right)^{t-1}$$

（2）年数合计法：它的折旧率是逐年变少的，它以预计使用年限的年顺序数之和为分母（如使用五年，则 1+2+3+4+5=15），按相反顺序年数为分子定出折旧率，如第一年为$\frac{5}{15}$、第二年为$\frac{4}{15}$、……。可按下式求第t年的折旧费。

$$第t年折旧费=\frac{使用年限-t+1}{0.5\times 使用年限（使用年限+1）}\times（原值-残值+拆除费）$$

用此法时，固定资产的大部分价值在其使用年限的前三分之一时就被划销。

1.5 经济寿命和更新经济

1.5.1 设备寿命

设备的寿命可分为：

（1）物质寿命　从开始使用直到不能再用而报废所经历的时间。如不考虑技术衰退或过时，也不顾运行和维修费用的不断增高，对可修复设备的物质寿命几乎是无限的。

（2）技术寿命　从开始使用到因技术落后或型式过时而被淘汰所经历的时间。

（3）使用寿命　从开始添置至被卖掉或转让为止的时间。

（4）会计寿命　即财务上对设备加以折旧的年限。

（5）经济寿命　指在经济上认为最有利的设备使用年限。它是以设备具有最低等值年成本的使用年数来确定的。超过经济寿命年限即应考虑是否设备更新。

设备到达经济寿命后，并不意味被淘汰，一般可降级使用；如远洋船舶退役为沿海船舶。设备降至下一级服务时，又有该情况下的经济寿命。设备的寿命将是一系列经济寿命之和，每一期经济寿命表达功能的一次衰退，并且都有一个较低的成本稳定时期，直至最终被报废彻底淘汰为止。

1.5.2 设备更新

更新就是原有设备被更经济的设备或方法所替换。设备到达其经济寿命后，并不一定马上要更新，必须用设想的更新方案与不更新之间再作经济比较分析，证明更新确实有利方予进行。

在作更新经济比较时，不论原设备的折旧费是否提完，是否仍有较多的账面价值，皆以新的服务周期开始时的净变现价值，即当时处理该设备的残值（公开市场价格）作为继续使用原有设备的投资。在此基础上与推荐的更新方案比较他们的等值年成本。因为原有设备的经济寿命比推荐设备为短，并且头一年的成本最低，所以先用其经济寿命为一年加以检验，如果原有设备通过检验，再研究更长的经济寿命就无必要了。如果不能通过，则必须检验在更长的经济寿命时能否产生一个较低的等值年成本。新换设备的第一年的年成本一般远高于整个寿命期的年成本，所以很少使用一年寿命期。

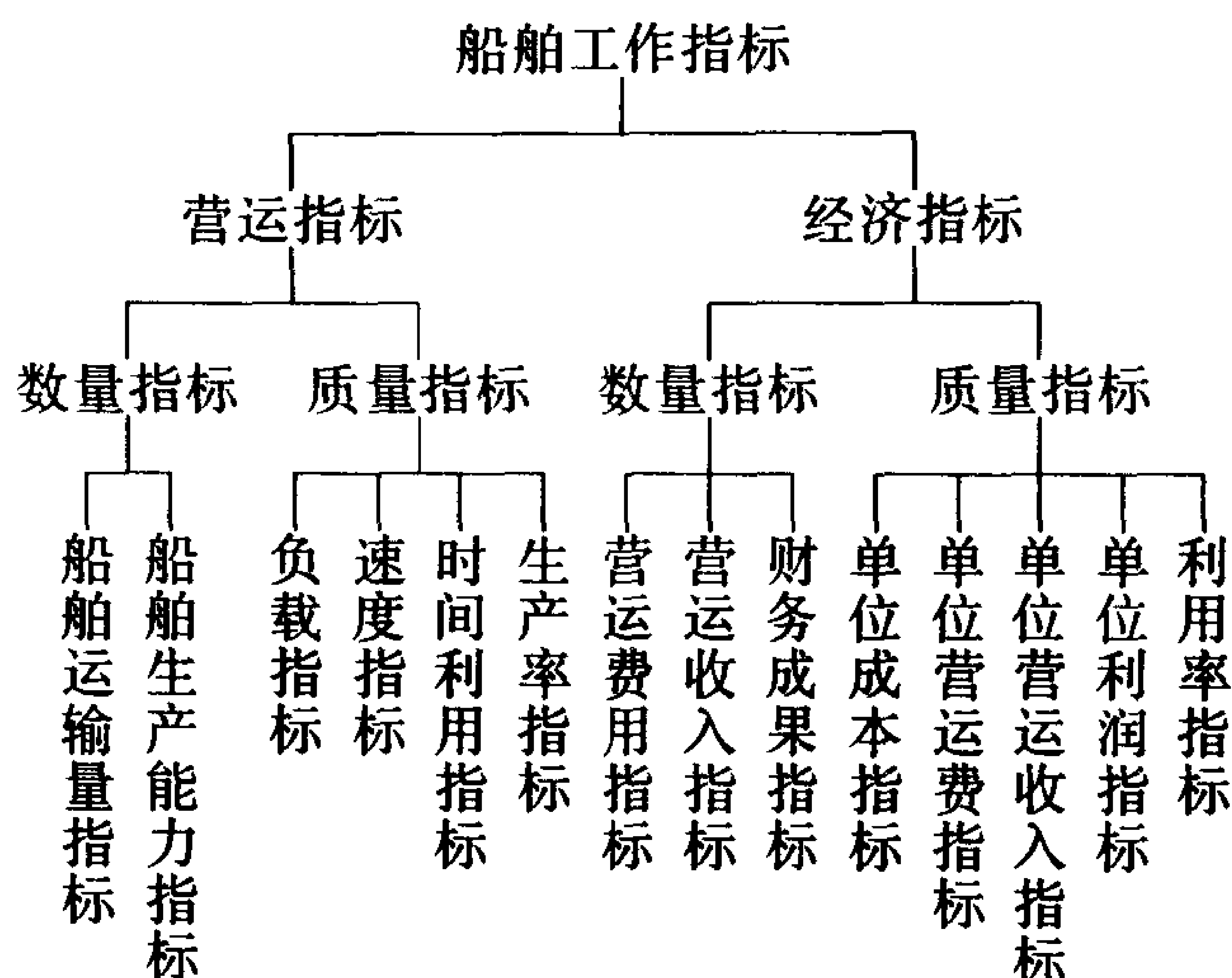
被替换下来的设备在降级使用或留作备用时，也必须以经济性较优作为留用依据，否则将从企业的资产负债表中勾销。

更新方案首先应考虑原有设备的改进，除重新设计改造外，也包括设备的检修和大修，以弥补性能衰退。重新改造后的设备不能要求在效率方面和新设备一样，主要应能达到要求的经济水平。

更新不一定要用全新设备，如果设备的利用率很低，可用租借设备的方案。若为了短期的作业，通常购买良好的旧设备，当任务完成后再卖掉，可能比租借设备更为经济。

2 船舶营运经济指标和统计

按水运企业管理工作需要，船舶工作指标体系为



工作指标可按每艘船、船队和航运企业作为计算范围，也可按年、月、日或航次计算。

2.1 船舶生产能力指标

这类指标表明水运企业可使用的运输船舶技术属性的最大能力，如

（1）船舶保有量——以艘、吨位、客位和主机功率为计量单位。每艘船不论大小、均按一艘计(不包括船上救生艇)。吨位系指船的额定载货吨数，即净载重量或登记载重量。功率为主机的额定功率。蒸汽机按指示功率，内燃机按制动功率，汽轮机按轴功率计算。上述计量皆以船舶出厂或技术部门核定额定数为准。若因改装等原因，需要改变额定数，应报经上级机关和有关部门审批。

（2）船舶吨位（客位、功率）次数——这一指标反映船舶周转情况

$$船舶吨位次数=\sum(船舶额定吨位\times船舶航次数)$$

（3）船舶时间利用情况指标——以吨位（客位、功率）天为计算单位来反映营运情况。船舶在册总时间分营运时间（航行、停泊、其他工作）和非营运时间（修船、待修、等待报废，洗炉等）两部分。

（4）船舶吨（客位、功率）公里（海里）——按重航和空航里程分别统计。

2.2 船舶运输工作量指标

（1）货运量　船舶运输的货物量，以吨计，分为到达量、发出量和中转量三种。

（2）客运量　船舶运输的旅客人数，以发售的客票数为统计依据。

（3）货物周转量　用于考核船舶生产效率。

$$货物周转量=货运量\times货物运输距离\quad[吨海里]$$

（4）旅客周转量

$$旅客周转量=客运量\times旅客运输距离\quad[人海里]$$

（5）换算周转量　当货船运客或客船运货时，将客、货周转量换算为统一单位后，再与总周转量相加。我国换算标准为

铺位客运　1人＝1t

座位客运　3人＝1t

对一个独立核算的水运企业，货物使用同类船舶进行接运时，货运量只能计算一次，不得重复计算。两个水运企业合作运输时，如难以划分承担方和出租方时，运输量按运费分摊比例计算。运量统计均按当日18点为截止时间。

2.3　船舶运用情况指标

2.3.1　船舶时间利用指标

（1）营运率　指营运时间所占的比重

$$营运率=\frac{\sum(船舶吨位\times船舶营运天数)}{\sum在册船舶吨位天数}\times100\%$$

（2）航行率

$$航行率=\frac{\sum航行船舶吨天数}{\sum营运船舶吨天数}\times100\%$$

（3）重航率　只要有载航行，不论载运多少均属重航

$$重航率=\frac{\sum重航船舶吨天数}{\sum营运船舶吨天数}\times100\%$$

（4）平均航次时间　反映平均生产周期的快慢

$$平均航次时间=\frac{\sum营运船舶吨天数}{\sum(相应船舶吨位\times航次数)}\text{天/次}$$

2.3.2　平均航速

它取决于船舶性能，船员水平、燃料、航道和气象等因素，不仅反映船舶周期，也包含货物运输时间的长短。

$$平均航速=\frac{\sum船舶吨海里}{\sum航行船舶吨天数}\text{海里/天}$$

2.3.3　船舶负载指标

它取决于往返货流均衡、货种、配载和货源组织等因素。

货船：

$$载重量利用率=\frac{\sum船舶换算周转量}{\sum船舶吨海里}\times100\%$$

$$重航载重量利用率=\frac{\sum船舶换算周转量}{\sum重航船舶吨海里}\times100\%$$

$$亏载率=1-重航载重量利用率\quad\%$$

$$空驶率=1-\frac{载重量利用率}{重航载重量利用率}\%$$

拖船：

$$平均每千瓦推拖量=\frac{\sum拖带货物吨公里}{\sum船舶功率公里}\quad\text{t/kw}$$

2.3.4　船舶生产率指标

又称单位天产量，不仅反映船舶利用程度，也反映整个运输生产的管理水平。

$$船吨天生产量=\frac{\sum货吨海里数}{\sum营运船舶吨天数}\quad t\cdot n\ mile/t\cdot 天$$

$$千瓦天生产量=\frac{\sum拖带货物吨公里数}{\sum营运船舶千瓦天数}\quad t\cdot km/kw\cdot 天$$

生产率＝载重量利用率×平均航速×航行率

$$平均每吨生产量=\frac{\sum货物吨海里数}{平均船舶吨位数}$$

或　＝生产率×营运率×日历天数

$$平均船舶吨位数=\frac{在册船舶总吨位天数}{日历天数}$$

货船运输能力＝生产率×营运率×在册船舶总吨位天数

2.4　船舶燃料消耗统计指标

2.4.1　燃料消耗量统计

凡水运企业的运输用机动船均应纳入统计。

1)营运消耗量

(1)航行消耗量　从起航时车钟命令“备车”开始至航行结束命令“完车”为止期间的燃料消耗量。

(2)停泊消耗量　指除装卸作业之外的停泊时间内（包括途中停泊）的消耗量。

(3)作业消耗量

①装卸消耗量　指装卸作业时。

②移泊消耗量　指港内移泊时。

(4)其它工作消耗量　指临时港内作业、等待报废、救援遇难船舶等的消耗量。

2)非营运消耗量

这是指因修船(航修、检修和厂修)、试航、洗舱或洗炉等，使船舶不能投入营运时的燃料消耗量。

3)封存船舶消耗量

船舶自停航封存之日起至启封之日的消耗量。

2.4.2　平均燃料消耗量

(1)技术定额计算　指按船舶的营运（航行）千瓦时计算

$$每营运千千瓦小时平均消耗量=\frac{实际消耗量}{营运（航行）千瓦小时}\times 1000\ kg/(1000\ kw\cdot h)$$

(2)企业定额计算　按换算周转量计算

$$每换算千吨海里平均消耗量=\frac{实际消耗量}{换算周转量}\times 1000\ kg/(kt\cdot n\ mile)$$

平均燃料消耗量是主管部门下达燃料消耗定额的指标，并以此计算燃料超耗量或节约量

$$单船单耗=\frac{（月、季）燃油实耗量}{额定功率\times（月、季）运转小时}\times 1000\ kg/(1000\cdot kw\cdot h)$$

$$企业单耗=\frac{\sum各船燃油实耗量}{\sum(各船额定功率\times运转小时)}\times 1000\ kg/(1000\ kwh)$$

$$燃料\begin{matrix}节约（+）\\超耗（-）\end{matrix}总量=\frac{（计划单耗指标-实际单耗）\times运转千千瓦小时}{1000}t$$

上式中额定功率指主、副机铭牌上标定的功率。按主机和发电机分别计算其运转千瓦小时后，再相加得和。

因燃料品种不同，应按燃料油、重柴油、柴油和煤分别统计。对于燃煤，则按我国规定的标准煤发热值 29307.6 kJ/kg(7000 kCal/kg)，将实际耗煤量折算成标准煤消耗量予以统计。

$$标准煤消耗量=实际耗煤量\times\frac{使用煤的发热值}{29307.6}$$

2.5 海损及机务事故统计

水运企业以无海损、无机损、无货损货差、无工伤、无污染和无火灾作为船舶运输安全生产的质量标准。

2.5.1 海损事故统计

凡是由于自然灾害或意外事件而使船舶或货物遭受直接或间接损失的事故称为海损事故。按具体内容可分为碰撞、搁浅、触礁、触损、浪损、风损、火灾和其它等八类。其统计原始记录为“船舶海损事故报告”。

海损事故可按发生的性质、损失和政治影响分为四级，分级依据列于表 1.3.3-2 中。在特殊情况下，事故损失虽小，但政治影响严重的，经领导机关决定，也可按重大事故或大事故统计处理。

表 1.3.3-2　**海损事故等级表**

事故标准＼船舶等级	5000 吨以上或 5000 马力以上的船舶	1000 吨以上至 5000 吨或 1000 马力以上至 5000 马力的船舶	200 吨以上至 1000 吨或 200 马力以上至 1000 马力的船舶	200 吨及以下，或 200 马力及以下的船舶
重大事故	1.死亡 3 人及以上或 2.船舶沉没、全损或无修复价值或 3.直接损失 50 万元以上	1.死亡 3 人及以上或 2.船舶沉没、全损或无修复价值或 3.直接损失 30 万元以上	1.死亡 3 人及以上或 2.船舶沉没、全损或无修复价值或 3.直接损失 10 万元以上	1.死亡 3 人及以上或 2.船舶沉没、全损或无修复价值或 3.直接损失一万元以上
大事故	1.死亡 1 至 2 人或 2.直接损失 5 万元以上至 50 万元	1.死亡 1 至 2 人或 2.直接损失 3 万元以上至 30 万元	1.死亡 1 至 2 人或 2.直接损失 1 万元以上至 10 万元	1.死亡 1 至 2 人或 2.直接损失 2 千元以上至 1 万元
一般事故	1.人员有重伤或 2.直接损失 2 千元以上至 5 万元	1.人员有重伤或 2.直接损失 1 千元以上至 3 万元	1.人员有重伤或 2.直接损失 5 百元以上至 1 万元	1.人员有重伤或 2.直接损失 2 百元以上至 2 千元
小事故	1.人员有轻伤或 2.直接损失 2 千元及以下	1.人员有轻伤或 2.直接损失 1 千元及以下	1.人员有轻伤或 2.直接损失 5 百元及以下	1.人员有轻伤或 2.直接损失 2 百元及以下

2.5.2 船舶机损事故统计

凡船舶机械设备发生故障或损坏，并造成直接或间接损失者，均称为机损事故。

1)责任事故

(1)船员责任事故　系指船员违反劳动纪律和操作规程，对机械设备管理使用不当，不按预检日程检修，保养疏忽，自修质量不良或对厂修质量检验不严所造成的事故。

(2)非船员责任事故　系指厂、站违反工艺操作规程，机修质量不好，材料及燃料质量不符要求，新机或新换机件设备设计不当所造成的事故。

2)非责任事故

(1)自然损坏　由自然磨损、腐蚀等所致者。

(2)其它非责任事故　指不属于有关部门和人员的责任或其它不可抗拒的原因所造成者。

3)机损事故统计分级

(1)轻微事故　指损失程度小于一般事故者。记入轮机日志、航海日志和安全活动记事簿中，报请水运企业备案，但不上报。

(2)一般事故　凡船舶由于机损造成直接和间接损失符合表1.3.3-3中之一者。表中直接损失包括修理费、备件费、因事故而支付的船舶检验费、潜水检查费、拖带费、赔偿费及其它费用等；间接损失包括耽误航行和因修理而耽误的装卸和生产时间。不论性质如何，均应填写“船舶机械损坏事故报告书”上报。

表1.3.3-3　**一般机损事故标准**

损失项 / 损失数 / 船舶功率	直接损失金额	间接损失时间
500马力以下	500～1000元	3小时以上
501至2000马力	1001～5000元	7小时以上
2001至5000马力	5001～10000元	10小时以上
5001至10000马力	10001～15000元	12小时以上
10000马力以上	15000～20000元	16～20小时

(3)重大事故　系指造成的直、间损失大于一般事故损失的上限者。

(4)隐性事故　指因违章操作、管理不当或检修不周，虽未形成机损，但有可能酿成事故者，如轴承缺油过热、锅炉失水等。隐性事故应记入轮机日志、航海日志和安全活动记录簿，但不统计上报。其中性质恶劣的，根据机务部门要求也可填写“船舶机械损坏事故报告书”。

因机损事故而酿成的海损事故，应填写船舶机械损坏事故报告书连同船舶海损事故报告表一起上报，并作为机损事故统计。反之，因海损事故而造成的机损事故，虽也填写船舶机械损坏事故报告书，并附同海损事故报表一起上报，但不作机损事故统计。

2.5.3　船舶污染事故统计。

这是指船舶由于各种因素造成污染物对水域的公害，按对水域污染程度分为四级，列于表1.3.3-4。表中的直接损失金额包括污染清扫费用、按章应付的罚款或赔偿费和损失油料的折价等。

表1.3.3-4　**船舶污染事故分级**

损失项 / 事故等级	跑、冒、漏、溢油量	直接损失金额	耽误船期
严重事故	1000 kg以上	5000元以上	两天以上
大事故	300 kg以上	2000元以上	一天以上
一般事故	100 kg以上	1000元以上	6小时以上
微小事故	100 kg以下	1000元以下	6小时以下

污染事故的统计原始记录为“船舶污染事故报告”，由确定为污染事故的责任方统计。

2.6　经济活动分析方法

水运企业经济活动分析中常用的方法有以下几种。

2.6.1 对比分析法

将各同类核算指标相互比较，找出二者之间的绝对差异和相对差异(%)。应用对比分析必须注意指标的可比性，即指标的定义、计算口径、营运条件、计价基础和时间单位的一致性。

2.6.2 比率法

这是用两个指标之比来得出一个新的指标，从而判断企业的收益能力、投资效果、营运成绩、设备利用情况等等。如计算资金利润率、船舶营运率、船舶生产率等等。

2.6.3 趋势分析法

以基期指标数字作为100%，将以后各期相应数据都折成基期数字的相对百分数，从而观察这一指标的逐期变化趋势。这种方法要注意基期的选择，以免造成假象。

2.6.4 因素分析法

又称连锁替代法，以测定诸影响因素中的每个因素对指标的影响程度。分析时逐次地只将一个因素变动，其它因素暂时不动，直到全部因素替代完毕为止。

设某指标d由三个有关联的因素a、b、c所组成，于是其计划指标关系式为

$$d_0 = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 \tag{1.3.3-6}$$

在执行计划中，各因素分别为a_1、b_1、c_1，于是实绩指标为

$$d_1 = a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \tag{1.3.3-7}$$

现分析a、b、c三因素对产生偏差$\Delta d = d_0 - d_1$的影响。先设b、c不变，仅a_0变为a_1，由此算得指标为

$$d_2 = a_1 \cdot b_0 \cdot c_0 \tag{1.3.3-8}$$

发生的偏差为

$$\Delta d_1 = d_2 - d_0 \tag{1.3.3-9}$$

逐次计算b、c的影响，列式如下

$$d_3 = a_1 \cdot b_1 \cdot c_0 \tag{1.3.3-10}$$

$$\Delta d_2 = d_3 - d_2 \tag{1.3.3-11}$$

$$\Delta d_3 = d_1 - d_3 \tag{1.3.3-12}$$

也即三个因素而产生的指标偏差分别为Δd_1、Δd_2和Δd_3。

$$\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 = \Delta d \tag{1.3.3-13}$$

于是a、b、c三因素对指标的变化影响程度分别为

$$\frac{\Delta d_1}{\Delta d} \times 100\%,\ \frac{\Delta d_2}{\Delta d} \times 100\% \text{和} \frac{\Delta d_3}{\Delta d} \times 100\%$$

应用这种方法必须合理选择替代次序，次序不同时，虽总偏差Δd不变，但各因素的偏差Δd_1、Δd_2…会改变。一般应按各因素在营运活动中主次地位为序，先代入主要因素，后代入次要因素。为了保持分析前后一致，在每次分析时，各因素都要按同样次序代入。

2.6.5 盈亏平衡点分析

即产量—成本—利润分析，简称量本利分析。分析程序如下：

（1）计算产品销售或劳务收入

收入＝产量×单价

（2）计算产品或劳务总成本

总成本＝固定成本＋产量×单位产品变动费

（3）计算盈亏平衡点

盈亏平衡时，收入等于总成本，所以，

$$盈亏平衡产量=\frac{固定成本}{单价-单位产品变动费}$$

大于此产量时，企业获得利润；反之则亏损。产量与利润的关系为

$$产量=\frac{固定成本+利润}{单价-单位产品变动费}$$

上述关系可见图 1.3.3-2

3 运输成本

水运成本可分为运输成本和港口业务成本两部分，其中大部分与生产直接有关，但那些并非在生产中直接发生的以及经营管理中发生的损耗，也计入成本之内。

运输成本是船舶运送货物和旅客的成本，以客、货运综合周转量（换算千吨海里）为成本计算单位。根据管理需要，沿海运输企业还应计算单船成本，远洋运输计算航次成本，而江河运输则分别按不同的船舶类型（客、货、拖、驳等）计算成本。

成本项目由国家主管部门规定，企业可按需要适当增设必要的明细项目。

水运企业运输成本项目分船舶费用和企业管理费用两大类。

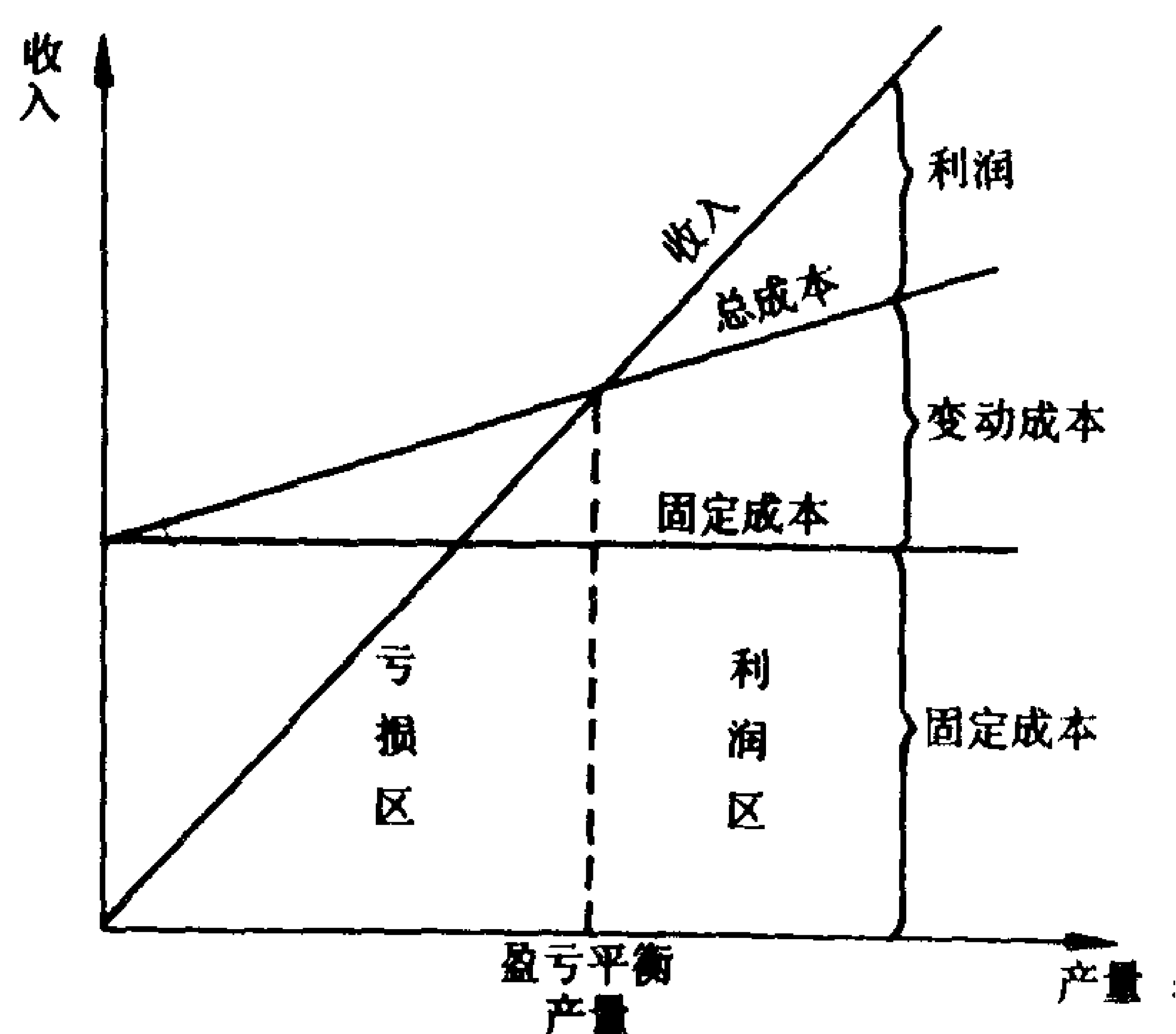


图 1.3.3-2 盈亏平衡图

3.1 船舶费用

它包括船舶从事运输工作所发生的各项费用。

（1）船员工资 在航船员的基本工资和辅助工资（津贴、奖金和伙食费用等）。在其它项目中列支的奖金不包括在本项目内。

（2）按规定比例提取的职工福利基金。

（3）燃料 包括航行、停泊、作业和其它消耗的全部燃料。燃料价格包括购入原价和加油费用。

（4）润滑油料 耗用的全部润滑油料。

（5）材料 营运耗用和日常事务耗用的各种材、物料和低值消耗品。营运中的废旧料可定期回收交库作价冲减材料费用。

（6）折旧费 按船舶价值和规定的折旧率按月计提。

（7）船舶修理基金 据船舶价值和规定的提存率，按月计提。因事故发生的修理费计入事故损失。

（8）港口费 指船舶在港口发生的引水、港务、拖轮、停泊等费用、以及代理、理货、

开关舱、扫舱、洗舱、烘舱、翻舱等客、货运业务费用。航行国外船舶还包括吨税、过境税、运河费、灯塔费、系解缆费、海关检验费、检疫费、熏舱费、清除垃圾费、货物装卸费、货物转口费及垫舱料等等。

（9）保险费　企业向保险公司投保的船舶险和船员险所支付的费用。

（10）事故损失　发生各种事故而支付的赔偿费、修理费和善后处理费用。

（11）其它费用　指不属以上项目的船舶费用。

3.2　企业管理费

（1）企业管理部门（管理、供应、通讯部门等）职工的工资和提取的福利基金以及工会经费等。

（2）企业管理部门耗用的燃料和材料

（3）企业管理部门和非生产用固定资产按规定计提的折旧和大修理基金，以及企业管理部门固定资产（船舶除外）的修理费。

（4）企业管理部门的办公费和旅差费。

（5）企业管理部门（包括福利部门）应负担的财产、物资等保险费用。

（6）企业管理部门使用的业务票据、航海图书、技术资料以及研究试验等业务费用。

（7）职工短期培训经费。

（8）燃、材料盘亏和毁损。

（9）会议费、招待费以及出国人员经费。

（10）仓库经费。

（11）行政管理部门购置的消防器材费用。

（12）劳动保护费。

（13）利息支出。

（14）其它费用。

4　成本管理

成本管理是企业经济核算的核心，其目的在于组织企业职工在保证运输安全质量的前提下，不断地降低生产成本，以提高企业的经济效益。

4.1　成本管理内容

（1）开展成本预测，确定目标成本。目标成本是按照目标利润的要求，在分析各种技术经济条件、发展前景和应采取的措施基础上加以确定的，它是成本管理的奋斗目标。

（2）编制成本计划。通过对比分析，在为实现目标成本的各种方案中选择经济效益最佳方案。

（3）进行成本控制。对成本实际形成过程进行系统地监督和及时改正产生的偏差，使成本限制在成本计划之内。

（4）开展成本核算、分析和考核。水运企业的成本考核指标一般有换算周转量单位成本（元/换算千吨海里）、换算周转量成本降低额和换算周转量成本降低率等等。

4.2 成本计划的编制

成本计划是以货币形式预先规划企业在计划期间的各项开支、总成本、单位运输成本、成本降低额和降低率。

4.2.1 成本计划编制程序

（1）收集和整理基础资料。包括消耗定额、工时定额、计划价格目录；初步拟定的企业生产、劳动工资计划；上级部门财务规定和本企业以及同行业的成本水平等等。

（2）根据企业情况，按照预计基年平均单位成本水平，参照本企业历史上最好成本水平和同行业先进水平，分析降低成本潜力结合上级要求确定成本降低指标。

（3）拟定成本归口部门和下级单位的成本控制指标。通过调查研究、测算、平衡后，由企业领导批准下达。

（4）各成本归口部门编制所掌握的生产消耗的成本、费用计划。

（5）审核各成本归口部门的成本、费用计划，综合平衡，汇编企业成本计划。

4.2.2 成本计划编制方法

水运企业成本计划包括运输成本计划和营运费用预算。成本计划是在计划年开始前编制的，对基年平均单位成本只能加以预计。

$$\text{预计基年平均单位成本}=\frac{\text{编制计划前各月份实际发生成本}+\text{以后各月预计发生成本}}{\text{编制计划前各月分产量}+\text{以后各月预计产量}}$$

在预计基础上总结经验，从而测算计划年成本可能降低的程度，若已达到要求的成本降低率，即可编制成本计划草案。成本降低率计算方法为

$$\text{运输总成本}=\text{运输费合计}-\text{与运输无关费用}$$

$$\text{每换算千吨海里单位成本}=\frac{\text{运输总成本}}{\text{换算周转量}}$$

$$\text{成本降低额}=\begin{array}{c}\text{基年预计换算}\\\text{吨海里单位成本}\end{array}\times\begin{array}{c}\text{计划年计划}\\\text{换算周转量}\end{array}-\begin{array}{c}\text{计划运输}\\\text{总成本}\end{array}$$

$$\text{成本降低率}=\frac{\text{成本降低额}}{\begin{array}{c}\text{基年预计换算吨}\\\text{海里单位成本}\end{array}\times\begin{array}{c}\text{计划年计划}\\\text{换算周转量}\end{array}}$$

1)运输成本计划

编制运输成本计划时，按下列方法计算数据：

（1）船员工资应根据批准的船舶定员表及规定标准计算，一般由劳动工资部门在编制劳动工资计划时提供。

（2）职工福利基金按工资总额的规定百分比计算。

（3）燃、润料费用由机务部门根据运输船舶工作计划，结合消耗定额和计划价格填制船舶燃、润料费用计算资料表，由财务部门予以测算核实。

（4）材料由供应部门按物料供应标准和计划价格计算，经财务部门审核同意后列入计划。

（5）船舶折旧费根据计划年全期应计折旧船舶平均总值和平均折旧率计算。

（6）船舶修理费按机务部门编制的修船计划所列的修理费审查编列。如为统一提存修理基金者，则按计划年全期应修船舶平均总值和提存率计算，并不再计算大修理基金提存。

（7）租费按租船合同计算。

（8）港口费一般参照基年船舶营运吨天数和计划年情况的变动，按比例推算。

(9)保险费按投保价值乘以年保险率计算。

(10)事故损失一般在成本计划中不予计列。

(11)企业管理费应按规定项目，由总务部门编制供应业务计划表、电讯部门编制通讯业务费用计划表，分送财务部门审查汇总，列入。

2)营运费用预算

营运费用预算是企业为了生产所需一切费用的总预算，不论是物资消耗还是现金支出一律计算在内。营运费用按费用要素分类，各个费用项目都是独立的，使成本计划同生产、物资供应和劳动计划衔接起来，并可据以计算企业流动资金需要量。

营运费用预算中的计划期营运费用合计，减去与运输成本无关的费用后，应和运输成本计划中的运输总成本相符。

5 船舶经济核算

5.1 船舶月度核算

船舶经济核算是水运企业内部的一级核算，只核算限于和本船生产有关的指标，包括：

(1)生产量指标　货运量（吨）、换算周转量（吨海里）；

(2)安全质量指标　海损、机损、货损、货差、工伤、污染和火警等事故损失；

(3)效率指标　营运率、载重量利用率、平均航速、吨（人、千瓦功率）天生产量等；

(4)燃料消耗指标；

(5)费用指标　润料、物料、工属具修理费、文具用品及其它支出；

(6)财务指标　运输收入、运输成本和营运利润。

年度经济指标由企业下达各船，各指标实绩的计算方法如下：

1)安全质量　按实际发生的各种事故填报。

2)产量和运输收入　按货物交接清单乘航线运距算出周转量，运输收入按运费清单计算。

3)运输成本

(1)工资　按船员工资发放单和伙食费计算。

(2)燃料　按月度燃料消耗报表和计划单价计算。

(3)润、物料　根据领料单上领用数量，按计划单价计算。

(4)折旧费、修理基金提存　根据企业通知金额计算

(5)港口费　按本月各航次在港口发生的有关费用计。

(6)事故损失　损失款项金额往往通过多次交涉才能确定，所以只能估算。

(7)船舶共同费用和企业管理费　按企业通知分配额计算

(8)其它费用　如淡水费、外付车船费，业务杂支等。

4)营运利润

利润＝运输收入－运输成本－运输成本×营业税率

税后利润＝应税利润×（1－所得税率）

5.2 船舶航次核算

计算航次成本时，分固定成本和变动成本两部分。固定成本指营运费用中与生产量增减

无关的部分，如工资、折旧费、修理基金、保险费等等。核算时按本航次营运天数比例分摊

$$航次固定成本=\frac{固定成本年度计划数}{年度计划营运天数}\times航次营运天数$$

变动成本则包括本航次发生的燃料费和港口费等等。

航次利润＝航次收入－（航次固定成本＋航次变动成本）－营业税－所得税

为了评价航次中各种货载的经济效果，对有些为几种货载共同发生的船舶费用，如固定费、燃料费、港口费等，应按实际各货载装卸运输情况比例分摊。

参考文献

〔1〕邓奇予，王群编著：水运企业营运经济活动分析，人民交通出版社，1983 年

〔2〕陈湖、陈启宇编：水运统计学，人民交通出版社，1984 年

〔3〕朱梦熊编著：水运企业财务管理，人民交通出版社，1985 年

〔4〕王剑琴、曾文中编：技术经济分析，广东科技出版社，1985 年

〔5〕G. A. 泰勒（美）：管理经济与工程经济，复旦大学出版社，1986 年

第 4 章　海商法基础

1　海商法（Maritime Law）概述

1.1　海商法的调整对象

任何一个部门法都是调整一定法律关系的法律规范的总和。海商法调整海上运输中产生的以及与船舶有关的法律关系。其中：

1)海上运输中产生的法律关系主要包括：

(1)提单、租船合同和联运合同等产生的海上运输合同法律关系；

(2)船舶碰撞、船舶油污等产生的海上侵权行为法律关系；

(3)海上救助、共同海损、船舶所有人责任限制、海上保险等因海上特殊风险产生的法律关系。

2)与船舶有关的其它法律关系是因船舶登记、船舶航行权、船舶引航、船长与船员、船舶管理等所产生的属于行政法、公法范畴的法律关系。

1.2　海商法的渊源（Sources of Maritime Law）

即海商法的法律规范的表现形式，包括：

1)国内立法（National Legislation）：是一国立法机关依法律程序制定并实施的法律，如《中华人民共和国海上交通安全法》。

2)国际公约(International Convention)：是有关国际海运的国际协议，对缔约国有约束力。(我国参加的海运国际公约：见附录)

3)航运习惯（Shipping Custom & Usage）：是指海上运输中形成的有着明确合理的内容，为航运界所周知、并不与当地法律相抵触的行业习惯。

4)在英美法系国家，法院的判例亦是渊源之一。

2　船舶与船员（Vessel & Crew）

2.1　船舶

海商法上的船舶，通常是指除军事舰艇以外的任何海船和其他海上浮动装置，包括生产船舶、专用船舶、公务船舶等。

2.2　船舶登记（Vessel's Registration）

为加强船舶的监督管理，确定船籍港，确认船舶航行权，根据我国《交通部船舶登记章程》，凡属于我国国家，集体和公民所有的船舶，除军事、公安舰艇外，均应在我国港口港务监督机关进行登记，取得船舶国籍证书、船舶登记证书或船舶执照后，方可悬挂我国国旗在海上航行。

如果船舶在国外取得所有权，应向我国驻外使、领馆申请核发临时船舶国籍证书。船舶到达国内港口后，办理正式登记手续，领取船舶国籍证书。

船舶所有人或船籍港变更时，应办理变更登记。如船舶所有权转移至外国人，或船舶沉没、失踪或报废，需办理注销登记。

2.3 船舶证书和文件 (Vessel's Certificates & Documents)

船舶在国际间航行，通常应备有下列证书和文件：

船舶国籍证书；船舶吨位证书；船舶载重线证书；船舶乘客定额证书；货船设备安全证书；货船构造安全证书；船舶无线电报或无线电话安全证书；客船安全证书；船舶入级证书；船舶起货机设备证书；航海日志；轮机日志；无线电台日志；船员名册；油类记录簿等。

2.4 船舶航行权 (Vessel's Navigation Right)

2.4.1 船舶航行权的概念　是指船舶在水上航行的权利。不同的水域具有不同的法律地位，船舶航行权也随之不同。

2.4.2 内水 (Internal Waters)

是领海基线向陆一侧的水域，包括港口、河流和内海等。它是沿海国领土的一部分，沿海国有权不让外国船舶进入。获准进入的外国船舶，必须遵守沿海国的法律和有关规定。

2.4.3 领海 (Territorial Sea)

是沿海国根据国家主权划定的领海基线向外延伸的一定范围的海域。我国的领海基线采用直基线，领海宽度为 12 海里。

沿海国对领海可行使主权。但根据国际法准则，各国一般允许外国商船享有无害通过权 (Right of Innocent Passage)，即外国商船在不损害沿海国的和平，安全和良好秩序的情况下享有通过沿海国领海的权利。沿海国可以规定外国军用船舶应事先通知本国主管机关并经许可后，方可无害通过本国领海。

2.4.4 国家管辖的其他海域还包括毗连区、专属经济区、专属渔区、防止海洋污染区等。

毗连区是指沿海国在向外海方向与其领海相邻接的海域，为实施海关、缉私、卫生防疫、移民事项的管辖而设立的特别区域。沿海国在专属经济区、专属渔区、防止海洋污染区内，分别享有资源的拥有和管辖权、渔业管辖权、海洋防污管辖权。外国船舶在这些海域航行时，不得妨碍沿海国上述权利的行使。

2.4.5 公海 (High Seas)

指各国领海以外的海域。根据国际法公海自由原则，在一国依法登记并悬挂该国国旗的船舶，可以在公海上航行，只受船旗国法律的约束。但是，这一原则也有例外，例如：

1)临检权(Right of Approach)　一国军舰在公海上遇到外国船舶，如有充分根据怀疑该船从事海盗、奴隶贩卖、非法广播、或该船无国籍，可驶近该船，查明国籍，必要时登船检查。

2)紧追权 (Right of Hot Pursuit)　沿海国如有充分理由认为外国船舶违反了本国法律或规章，有权派军事舰艇或政府船只对位于其领海内的外国船舶进行追逐，直至船舶进入他国领海，并加以拿捕，带回本国审讯。

3)在公海上航行的船舶，不得非法贩运毒品，不得抛弃放射性废料污染公海。

2.5 我国对外国籍船舶管理的有关规定

2.5.1 外国籍船舶进出我国港口的手续

外国籍船舶应在预定到达我国港口的一定时间之前，向港务监督机关办理申请手续。船舶进港后，接受联合检查，申报进口报告书(Entry Report)。船舶出港前应申报出口报告书(Departure Report)，接受联合检查，获得出口许可证（Port Clearance）后方可离港。

外国籍船舶如有下列情况之一，港务监督机关有权禁止其出港或令其停航、返航：

1)违反我国法律或规章；

2)船舶处于不适航状态；

3)发生海损事故，手续未清；

4)未交付应承担的款项，又未提供担保者；

5)其他妨害海上交通安全的情况。

2.5.2 参加外国籍船舶联合检查的机关及分工

1)港务监督机关　负责检查船舶证书文件和船舶航行安全事项。

2)海关　负责检查船上货物和船员旅客所带行李物品的违法走私等事项。

3)边防检查机关　负责对船舶及船员旅客的护照证件、行李物品等实施边防检查。

4)国境卫生检疫机关　负责对船舶、船员旅客及其行李、货物等实施医学卫生检查和必要的卫生处理。

2.6 船舶引航 (ship's Pilotage)

2.6.1 强制引航及其例外

为维护国家主权，保障港口和船舶安全，沿海国通常规定、对进出该国港口和在港内航行、移泊的船舶必须由该国引航员引航。军事舰艇、不超过规定吨位的船舶、港口专用船舶、游艇、沿海运输船舶、以及从主管当局获取免除引航证书的船舶等，通常不作强制引航要求。在我国，对我国远洋运输船舶亦不作强制引航要求。

2.6.2 船长和引航员的责任

在引航员引领船舶的过程中，不解除被引领船船长驾驶船舶之责。被引船船舶所有人对引航员的过失负责，引航员不负经济赔偿责任。只有少数国家规定引航当局须负一小部分经济责任。

引航员如犯有过失，应受到行政处分、罚款，甚至追究刑事责任。

2.7 船长的基本职责 (Master's Duties)

1)船长负责对船舶的驾驶和管理。船长在职权范围内发布的命令，在船人员均应执行。船舶发生危及船上生命财产安全的事故，船长应领导在船人员奋力抢救。当船舶沉没不可避免时，船长可决定弃船。弃船前，应抢救船上重要文件物品，救护旅客下船，船长自己最后离船。船舶发生海损事故，船长应作海事声明，送我国港口航政管理机关，或我国驻外使领馆签证。

2)船长的司法职能。船长对于船上危害船舶或船上生命财产的人员，有权进行拘禁。船长对船上犯罪的人，应采取措施，防止其逃亡、消灭证据，并作报告书，将罪犯送交我国公安机关或我国军舰。在国外，应报告我国驻外使领馆。

3)船长的公证职能。船长应证明船上每一出生或死亡事件，并作成报告书。

4)船长的救助义务。船长接到呼救信号或发现海上有人遇难，只要对自己船舶和船上人员没有严重危险，应尽力救助遇难人员。

5)船长的代理职能。船长可以作为船舶所有人和货主的代表，为船舶、货物或航行需要而订立合同。在有关船舶或货物的诉讼中，船长可代表船舶所有人或货主应诉或起诉。

3 海上运输合同（Contract of Carriage by Sea）

3.1 海上运输合同的概念

它包括海上货物运输合同和海上旅客运输合同。前者是指承运人与托运人，或出租人与承租人之间关于承运人或出租人用船舶将货物经海路从一港运送至另一港，而由托运人（或收货人）或承租人支付运费或租金的协议，包括提单、租船合同和拖航合同。后者是指承运人与旅客之间关于承运人用适合客运的船舶将旅客经海路从一港运送至另一港，而由旅客支付票价的协议。客票是这种合同的证明。

3.2 提单（Bill of Lading B/L）

提单是一种证明海上货物运输合同的订立和内容、和货物由承运人接管或装船、以及承运人据以保证在目的港交付货物的单证。提单能代表提单上所记载的货物，因而通常可用以买卖、抵押等。提单通常是在货物装船后，根据托运人的要求，由承运人、船长或承运人的代理人签发的。

3.2.1 提单的记载事项

提单所记载的事项包括船名、承运人和托运人的名称、装货港和卸货港、货物的说明(包括货物的数量、主要标志和外表状况等)、运费及其支付方式、签发人的签名和签发的时间、地点和份数等。

提单背面条款记载有关承运人和托运人的权利，义务和免责等内容。

3.2.2 承运人的责任和免责

根据1924年“海牙规则”，承运人的责任主要包括：

1)承运人应当在船舶开航以前和开航当时，谨慎处理——

(1)使船舶适航(seaworthy)，即使船舶具有克服航次中通常出现的或能合理预见的风险的能力；

(2)适当配备船员、装备船舶、配备供应品；

(3)使货舱及其他载货处所，适合于安全接受、保管和运送货物。

2)承运人应当适当而谨慎地接受、装载，积载、运送、保管、卸载和交付货物。

3)船舶不得进行不合理的绕航，即除为了救助海上人命财产，或者为了船舶和货物的安全或其他合理的特殊原因外，船舶不得变更或驶离合同规定的或通常习惯的航线。

承运人通常对下列原因造成的货物灭失或损害，不负赔偿责任：

1)承运人，船长和船员以及其他雇佣人员不能预见、不能克服的自然灾害或海上风险；

2)战争或公敌行为；

3)政府机关的检疫限制、扣押船舶、或者罢工、暴动等第三者的行为；

4)货物本身特性或缺陷，或货物包装、标志不当，或者货主本身过错；

5)船长、船员、引航员及其他雇佣人员在驾驶和管理船舶中的过失。非由于承运人本身过错造成的火灾；

6)船舶潜在缺陷(Latent defect)，即一个具有通常要求的技能并谨慎行事的人以通常的方法未能发现的缺陷。

3.3 航次租船合同 (Voyage charterparty, Voy. c/p)

3.3.1 航次租船合同的概念

是指为特定的航次而签订的租船合同。它由出租人（通常是船舶所有人、船舶经营人）负责提供船舶，在合同规定的港口或区域之间进行一个或几个航次的货物运输。

3.3.2 航次租船合同的主要条款

1)出租人同意提供适航船舶，并规定船名、船舶位置、载货能力和船级等；

2)出租人同意船舶应以合理尽快的速度驶往装货港；

3)出租人保证把货物运送至目的港；

4)合同解除条款：当船舶未能在规定时间内到达装货港时，承租人有权解除合同；

5)承租人同意提供满舱、满载的货物；

6)承租人同意按每吨货物或每单位容积的费率支付运费；

7)双方同意的免责事项；

8)有关货物装卸，尤其是关于装卸时间和延滞费、速遣费的规定；

9)首要条款 (Paramount clause)：规定合同受某一国际公约或某一国内法的约束；

10)仲裁条款，规定解决双方合同争议的仲裁地点。

3.4 定期租船合同 (Time charterparty Time c/p)

3.4.1 定期租船合同的概念

指出租人（船舶所有人、船舶经营人）按一定条件在一定期限内，把船舶出租给承租人按约定运送货物，而由承租人按时间支付租金的租船合同。

3.4.2 定期租船合同的主要条款

1)出租人同意在一定期限内提供适航船舶，并规定船名、船舶载货能力、航速、燃油消耗量和船上尚存燃油的数量；

2)出租人将船舶交给承租人和期满后承租人将船舶交还出租人的港口和时间；

3)承租人同意仅将船舶用于合法贸易，运送合法货物，并在能够始终使船舶浮泊的安全港口使用船舶；

4)承租人同意提供并支付燃料费、支付港口费用，安排并支付货物装卸费；

5)承租人同意按合同规定的租金率支付租金；

6)承租人同意向出租人赔偿因货物装卸工作中的疏忽所引起的船舶灭失或损坏；

7)合同解除条款；

8)停租条款，即非由于承租人原因，船舶不能正常营运的时间，承租人可停付租金。

9)双方同意的免责条款；

10)仲裁条款。

3.5 海上拖航合同 (Contract of Towage by Sea)

3.5.1 海上拖航合同的概念

指拖方与被拖方之间关于拖方用拖船把被拖船从一地拖至另一地，而由被拖方支付拖航费用的协议。拖带过程由拖船船长负责指挥。

3.5.2 拖方的责任与免责

与提单运输中承运人的责任和免责相类似。

3.5.3 被拖方的义务

在拖带过程中，被拖船上的人员应采取合理的技术措施加以配合，不能给拖带作业增加风险。被拖方应保持被拖船的适拖性。

3.6 海上旅客运输合同 (Contract of Carriage of Passengers by Sea)

3.6.1 承运人的责任与免责

1)承运人必须提供适航和能安全运送旅客的船舶，并在整个运送过程中保持上述状态;

2)承运人对由于其本人或他的受雇人或代理人的过失造成旅客人身伤亡或财产损害负责赔偿。但由于下述原因引起的旅客人身伤亡或财产损害，承运人不负赔偿责任:

(1)战争行为、武装暴动、不可抗力或其他承运人及其雇佣人员或代理人无过错的原因;

(2)旅客本身的原因或旅客的过错。

4 海事法 (The Law of Admiralty)

4.1 船舶碰撞 (Collisions at Sea)

4.1.1 船舶碰撞的概念

指海船与海船或海船与内河船发生碰撞，致使有关船舶或船上人身、财产遭受损害，而不论碰撞发生在任何水域。

间接碰撞，即一船超速航行兴起的波浪造成他船浪损、或一船为避让不正当航行的他船而被迫搁浅等，以此类推，适用海事法中船舶碰撞的法规。

4.1.2 船舶碰撞责任

1)船员无过失的碰撞，指由于下列原因造成的碰撞:

(1)意外: 碰撞双方均已克尽职责，采取了一切合理的防范措施，但碰撞仍然发生。

(2)不可抗力: 碰撞系双方不能预见并不能克服的自然灾害所致。

(3)碰撞原因不明: 碰撞的双方均不能证明对方有过错。

由此造成的损害由遭受者自行承担。

2)船员过失引起的碰撞包括:

(1)单方过失引起的碰撞: 损失由过失方承担。

(2)双方互有过失的碰撞: 损失由各方按过失程度比例分摊。如果过失程度相等，或无法确定过失比例时，损失由各方平均分摊。但是，美国现行的做法是: 碰撞双方互有过失，损失一律由各方平均分摊。

4.1.3 船舶碰撞发生后的处理要点

1)采取紧急抢救措施，防止船舶全损或损失的扩大。在不致对本船船舶、船员和旅客造成严重危险的情况下，应努力救助对方船舶、船员和旅客。

2)弄清本船和他船的受损情况。应尽可能把本船的船名、船舶所有人名称、船籍港、始发港和目的港通知对方。

3)做好现场事故情况的详细记录。

4)尽快将事故情况电告船公司。

5)确定事故处理地点。根据船公司的指示与对方船舶约定前去的港口。

6)办好书面通知。如果认为碰撞系对方或双方互有过失所致，应向对方发出要求其承担责任的通知，并声明我方保留向对方索赔的一切权利。

7)在碰撞事故后，应及时在第一到达港向港口当局和我国驻外使领馆发出海事声明，并抄送对方和有关各方。报告的内容主要包括：事故起因，受损情况，证明人，以及声明保留进一步补充声明的权利。

8)申请检验。应通知对方到船参加检验，取得检验报告。

9)办理担保或其它诉讼保全措施。

10)准备好处理案件所需材料，包括：海事声明、海图、航海日志、轮机日志、检验报告等。

4.2 海上救助 (Salvage at Sea)

4.2.1 海上救助的概念

指对遭遇海难的船舶、货物和船上人员的全部或部分，由外来力量进行救助，而不论救助发生在任何水域。

4.2.2 救助报酬请求必须具备的条件

1)被救财产必须遭遇海难　即船舶、货物必须遭遇因航海发生的危险，处于不能自救状态。通常，将海难的构成局限于通航水域发生的航海事故。

2)救助要有效果　救助报酬必须以船舶或货物的全部或部分获救为必要条件，即“无效果无报酬”(No cure, no pay) 原则。如果是救助油船，即使救助没有成功，只要救助人采取了防止或减轻油污损害的措施，亦可得到一定的补偿。因此，对油船救助采用“无效果若干报酬”(No cure, some pay) 原则。

3)救助人必须没有救助义务　下列情况，被认为有救助义务：

(1)船长、船员在本船遇难时对本船的人命、船舶或货物的救助；

(2)对海上遇难人员的救助；

(3)两船发生碰撞，船长、船员对他船船上的人命、财产的救助。

如果遇难船明白合理地拒绝救助，或救助人本身有过错，或救助人有盗窃被救财产等不法行为时，应限制或不承认救助人的救助报酬请求权。

4.2.3 确定救助报酬数额应考虑的因素

1)获救效果的程度；救助人的努力与劳绩；被救财产、救助船舶和救助方及被救助方所冒风险；救助工作所用时间、所耗费用和所受损失；救助行为是否防止或减轻环境污染等。

2)获救财产的价值。救助报酬不得超过这一价值。

4.2.4 海上救助种类

海上救助通常是根据救助人与被救助人间订立的救助合同而进行的。救助合同有两种形

式：

1)“无效果无报酬”救助合同。

2)雇佣救助合同。救助报酬以救助人所花人力和设备按章计时为依据。救助工作的指挥权仍在被救助一方。

5 海上保险（Marine Insurance）

5.1 海上保险的意义

海上保险，是指由被保险人（船舶所有人、货物所有人等）支付保险费，保险公司对因属于其承保范围的海上风险造成被保险财产的损害予以赔偿的制度。保险公司与被保险人之间的保险合同以保险公司签发的保险单（Policy）的形式表现出来。

5.2 海上保险的种类

海上保险包括船舶保险、运费保险、货物保险、期得利益保险和责任保险等。

5.3 中国人民保险公司船舶保险条款主要内容

5.3.1 责任范围 中国人民保险公司对被保险船舶的损失按下述险别予以赔偿：

1)全损险（Total Loss Cover）中国人民保险公司负责赔偿由于下列诸原因造成被保险船舶的全部损失：

（1）自然灾害或意外事故；

（2）船壳和船舶机件的潜在缺陷；

（3）船长、船员、引航员、修船人员或租船人员的疏忽行为；船长、船员有意损害被保险人利益的行为。

2)一切险（All Risks） 中国人民保险公司负责赔偿由于上述原因造成的船舶全部或部分损失，以及引起的责任和费用，包括：碰撞责任、共同海损和救助费用、以及船舶所有人防止或减少船舶损失而合理付出的施救费用。

5.3.2 除外责任

中国人民保险公司对下列原因造成的损失、费用和责任不负责赔偿：

1)船舶不适航，但以被保险人在船舶开航时，知道或应该知道此种不适航为限。

2)被保险人及其代表的疏忽或故意行为；

3)船舶的正常维修和自然耗损；

4)属于战争和罢工险范围的责任。

5.3.3 其他规定

它包括免赔额、航行区域、保险终止、保费和退费、被保险人义务、索赔和赔偿、争议的处理等。

5.4 船舶所有人保赔协会（Shipowner's Protection & Indemnity Club P&I Club）

5.4.1 船舶所有人保赔协会的性质和作用

船舶所有人保赔协会是船舶所有人互助保险性质的组织，它是由船舶所有人们自愿组织

起来，共同分担属于船舶所有人责任的损失赔偿，没有外资加入，不以营利为目的。

协会向会员提供的服务主要有：协助海事处理，为避免扣船而提供担保，提供技术指导，培训技术人员，草拟和修改各种合同等。

5.4.2　船舶所有人保赔协会承保的风险包括：

船员、装卸工人的人身伤亡，货损货差责任，油污索赔及罚款，法律诉讼费用等。

5.4.3　除外责任　船舶所有人保赔协会不负责赔偿由于下列诸原因引起的损失和费用：

1)船舶所有人故意或重大过失；

2)船舶不正当绕航；

3)货物在装前或卸后的损失；

4)船舶超载；

5)船舶所有人运输延误。

6　海事争议的解决

6.1　海事争议的概念

船舶在海上运输中发生海损事故，造成人身伤亡或财产损失，受害方向责任方请求损害赔偿，称为海事请求或海事索赔(Maritime claim)。双方就损害赔偿问题产生的争议，叫做海事争议（Maritime disputes)。

海事争议通过诉讼、仲裁、调解等途径解决。

6.2　海事诉讼 (Maritime Litigation)

6.2.1　海承诉讼的含义

是指海事请求人向具有管辖权的法院（我国为海事法院）起诉，借助法律程序解决海事争议的途径。

6.2.2　海事诉讼程序

它包括：1)起诉：提起诉讼的海事请求人即原告向法院提交起诉书。

2)担保：经原告请求，法院责令被告提供现金或财产保证，确保原告请求权的实现。如被告不提供担保，法院可依法扣押被告的船舶或其他财产。

3)审判：法院一般开庭审理案件，依据案件事实和法律作出判决。我国实行法院“两审终审”制，即一方不服海事法院的判决，可向该海事法院所在地的高级人民法院提出上诉。

4)执行：法院作出的发生法律效力的判决，具有强制约束力。如果当事人不自愿执行，法院即可强制执行。

6.3　海事仲裁 (Maritime Arbitration)

6.3.1　海事仲裁的含义

指海事争议的双方根据仲裁协议，将争议提交一名仲裁员或几名仲裁员组成的仲裁庭解决，这一解决争议的方法叫做海事仲裁。

我国的海事仲裁机构是在中国国际贸易促进委员会内设立的海事仲裁委员会。

6.3.2　仲裁程序

1) 申诉人（海事请求人）提交仲裁申请书；

2) 仲裁员：通常由争议双方各指定一名仲裁员，再由该两名仲裁员推选一名首席仲裁员，三人组成仲裁庭。有时，争议双方仅指定一名仲裁员进行独任仲裁。

3) 审理：仲裁庭一般开庭审理，并作出仲裁裁决。裁决通常是终局性的，并具有同法院判决一样的效力。

4) 裁决的执行：仲裁裁决要求争议双方自愿执行。如果一方不执行，另一方可以向法院申请强制执行。

6.4 调解 (Mediation)

对海事争议的调解是受理案件的法院或仲裁机关在审理案件之前或审理当中进行的；或是与法院和仲裁机关无关，由争议双方协商聘请调解员进行调解。调解达成的协议经双方当事人签字，即产生法律上的约束力。调解不能达成协议的，可按诉讼或仲裁途径解决争议。

附录

主要海运国际公约一览表

名　　称	生效日期
1. 海上安全方面	
1) 1974 年国际海上人命安全公约*	1980.5.25
1978 年议定书	1981.5.1
1981 年修正案	1984.9.1
1983 年修正案	1986.7.1
2) 1966 年国际船舶载重线公约*	1968.7.1
3) 1969 年国际船舶吨位丈量公约	1982.7.18
4) 1972 年国际海上避碰规则公约*	1977.7.15
1981 年修正案	1983.6.1
5) 1979 年国际海上搜寻与救助公约*	1985.6.22
2. 船员方面	
6) 1978 年国际船员培训、发证和值班标准公约*	1984.4.28
3. 海上客货运输方面	
7) 1974 年海上旅客及其行李运输雅典公约	1987.4.28
8) 1924 年关于统一提单某些法律规定的国际公约（海牙规则")	1931.6.
1968 年议定书（"维斯比规则"）	1977.6.
9) 1978 年联合国海上货物运输公约	未生效
4. 船舶碰撞方面	
10) 1910 年统一船舶碰撞某些法律规定的国际公约	1931.3.1
11) 1952 年船舶碰撞中民事管辖权方面某些规定的国际公约	（无资料）
12) 1952 年统一船舶碰撞或其他航行事故中刑事管辖权方面某些规定的国际公约	（无资料）
13) 1977 年统一船舶碰撞中有关民事管辖权、法律选择、判决的承认和执行方面某些规定的国际公约	未生效
5. 海上救助方面	
14) 1910 年救助公约	1913.3.1
1967 年议定书	未生效
1981 年议定书	未生效

续上表

名　　称	生 效 日 期
6．共同海损方面	
15）1974 年约克·安特卫普规则	自愿采用
7．船舶所有人责任限制方面	
16）1957 年国际海船所有人责任限制公约	1965.
17）1976 年海事索赔责任限制公约	1986.12.1
8．海上油污方面	
18）1969 年国际干预公海油污事件公约	1975.5.6
19）1973 年国际防止船舶造成污染公约及其 1978 年议定书*	1983.10.2
附则 I．防止油污规则※	1983.10.2
附则 II．控制散装有毒液体物质污染规则※	1987.4.6
20）1969 年国际油污损害民事责任公约*	1975.1.19
1984 年议定书	未生效
21）1971 年国际设立油污损害国际赔偿基金公约	1978.10.16
1984 年议定书	未生效
9．海事诉讼与仲裁方面	
22）1952 年关于扣押海运船舶的国际公约	（无资料）

注：带※号的国际公约我国已参加。

参考文献

〔1〕张既义、司玉琢，尹东年，於世成：海商法概论，人民交通出版社，1984 年 9 月

〔2〕中国远洋运输总公司资料室译：国际海运公约汇编，人民交通出版社，

附　　录

附录1　国际单位制与其他单位制的换算

附录1.1　长度单位换算表

米 m	英　尺 ft	英　寸 in	码 yd
1	3.28083	39.37	1.09361
0.304831	1	12	0.33333
0.025400	0.08333	1	0.02778
0.9144	3	36	1

注：1米＝10^2厘米＝10^3毫米＝10^6微米＝10^9毫微米＝10^{10}埃；
　　1公里＝10^3米＝0.6214英里＝0.5399海里。

附录1.2　面积单位换算表

米² m^2	厘米² cm^2	英尺² ft^2	英寸² in^2
1	10^4	10.7839	1550.00
10^{-4}	1	0.0010764	0.15500
0.09290	929.030	1	144
6.4516×10^{-4}	6.4516	0.006944	1

注：1公里²＝10^2公顷＝10^4公亩＝10^6米²；
　　1公顷＝15市亩；1市亩＝666.6米²。

附录1.3　容积单位换算表

米³ m^3	升 l	英尺³ ft^3	英加仑 Imp. gallon	英制桶 Imp. barrel
1	10^3	35.3145	219.98	6.134
10^3	1	0.035315	0.21998	6.134×10^{-3}
0.028317	28.31622	1	6.2288	0.173
0.004546	4.5459	0.16051	1	0.0277
0.163	163.654	5.779	36	1

注：1英加仑＝1.20095美加仑；1英制桶＝1.029美制桶；
　　1英制蒲式耳＝1.032美制蒲式耳＝36.3677升。

附录 1.4 质量单位换算表

公斤 kg	吨 t	英吨 Long ton	美吨 short ton	磅 lb	盎司 oz
1	10^{-3}	9.842×10^{-4}	1.1023×10^{-3}	2.2046	35.2739
10^3	1	0.9842	1.1023	2.2046×10^3	3.52739×10^4
1.0161×10^3	1.0161	1	1.12	2.24×10^3	3.58413×10^4
9.0719×10^2	0.90719	0.89282	1	2×10^3	3.20012×10^4
0.4536	4.536×10^{-4}	4.464×10^{-4}	5×10^{-4}	1	16.0007
2.834×10^{-2}	2.8349×10^{-5}	2.7901×10^{-5}	3.1249×10^{-5}	0.0625	1

附录 1.5 四种温标换算表

开尔文温标K	摄氏温标℃	华氏温标°F	兰氏温标°R
n	$n-273.15$	$\frac{9}{5}(n-273.15)+32$	$\frac{9}{5}n$
$n+273.15$	n	$\frac{9}{5}n+32$	$\frac{9}{5}n+491.67$
$\frac{5}{9}(n-32)+273.15$	$\frac{5}{9}(n-32)$	n	$n+459.67$
$\frac{5}{9}n$	$\frac{5}{9}(n-491.67)$	$n-459.67$	n

附录 1.6 力的单位换算表

达因 dyn	牛顿 N	公斤力 kgf	磅力 lbf
1	10^{-5}	1.0197×10^{-6}	2.2481×10^{-6}
10^5	1	0.10197	0.22481
9.8067×10^5	9.8067	1	2.2046
4.4482×10^5	4.4482	4.5359×10^{-1}	1

附录 1.7 密度单位换算表

公斤/米^3 kg/m^3	吨/米^3 t/m^3	磅/英尺^3 lb/ft^3	磅/英加仑 lb/Imp. gallon
1	10^{-3}	6.2428×10^{-2}	1.002×10^{-3}
10^3	1	62.428	1.002
16.0185	16.018×10^{-2}	1	0.16054
99.779	9.9779×10^{-2}	6.229	1

附录 1.8 体积流量单位换算表

升/秒 L/S	米^3/时 m^3/h	英尺^3/时 ft^3/h	英加仑/秒 Imp. gallon/S
1	3.6	1.2713×10^2	0.21993
0.27778	1	35.3147	6.1104×10^{-2}
7.866×10^3	2.8317×10^{-2}	1	1.73×10^{-3}
4.546	16.3655	5.78×10^2	1

附录 1.9 压力单位换算表

帕斯卡 Pa N/m^2	巴 bar $10^5N/m^2$	公斤力/厘米² kgf/cm^2	标准大气压 atm	磅力/英寸² lbf/in^2	托torr mmHg	毫米汞柱 mmH_2O
1	10^{-5}	1.019×10^{-5}	9.869×10^{-5}	1.45×10^{-4}	0.75×10^{-2}	0.1021
10^5	1	1.019	0.9869	14.503	750.06	1.21×10^4
98066.5	0.9806	1	0.9678	14.223	735.55	10^4
101325	1.01325	1.0332	1	14.695	760	1.034×10^4
6894	0.0689	0.0703	0.06804	1	51.71	703.26
133.32	0.00133	1.359×10^{-3}	1.315×10^{-3}	0.01933	1	136
0.9803	9.779×10^{-6}	10^{-5}	9.669×10^{-6}	1.42×10^{-4}	7.35×10^{-3}	1

注：kgf/cm^2也称工程大气压（或绝对大气压 ata）

附录 1.10 动力粘度单位换算表

帕斯卡秒 Pa·s N·S/m²	厘泊 CP g·s/100 cm	公斤力·秒/米² kgf·s/m²	磅力·秒/英尺² lbf·s/ft²
1	1000	0.101972	2.088×10^{-2}
10^{-3}	1	1.0197×10^{-4}	2.088×10^{-5}
9.807	9807	1	0.2048
47.88	47896	4.882	1

附录 1.11 运动粘度、导温系数的单位换算表

米²/秒 m²/s	斯托克斯 st cm²/s	英寸²/秒 in²/s
1	10^4	1.55×10^3
10^{-4}	1	0.155
6.45×10^{-4}	6.45	1

附录 1.12 功、热能单位换算表

焦耳 J	千卡 kcal	千瓦时 kw·h	英马力时 hp·h	公斤力·米 kgf·m	英热单位 Btu
1	2.38×10^{-4}	2.77×10^{-7}	3.72×10^{-7}	0.1019	9.47×10^{-4}
4186	1	1.163×10^{-3}	1.56×10^{-3}	427	3.96
3.6×10^6	860	1	1.341	3.67×10^5	3412
2.684×10^6	641	0.745	1	2.737×10^5	2.54×10^3
9.306	2.34×10^{-3}	2.724×10^{-6}	3.65×10^{-6}	1	9.295×10^{-3}
1.056×10^3	0.252	2.93×10^{-4}	3.93×10^{-4}	107.5	1

附录 1.13 功率单位换算表

瓦 W=J/S	千卡/时 kcal/h	英马力 hp	米制马力 ps	公斤力·米/秒 kgf·m/s	英热单位/时 Btu/h
1	0.86	1.341×10^{-3}	1.36×10^{-3}	0.1019	3.412
1.163	1	1.559×10^{-3}	1.581×10^{-3}	0.1185	3.968
745.7	641.18	1	1.013	76	2544
735.5	632.4	0.986	1	75	2509
9.806	8.432	0.01315	0.0133	1	33.46
0.293	0.252	3.93×10^{-4}	3.984	2.988×10^{-2}	1

附录 1.14 热容、熵单位换算表

千焦耳/开尔文 kJ/K	千卡/摄氏度 kcal/℃	英热单位/华氏度 Btu/°F
1	0.238	0.108
4.1868	1	0.4536
9.23	2.204	1

附录 1.15 比热、比熵单位换算表

千焦耳/公斤 · K kJ/（kg · K）	千卡/公斤 · ℃ kcal/（kg · ℃）	英热单位/磅 · °F Btu/Lb · °F
1	0.238	0.238
4.186	1	1

附录 1.16 热流密度单位换算表

瓦/米² W/m²	千卡/米² · 时 kcal/（m² · h）	英热单位/英尺² · 时 Btu/（ft² · h）
1	0.8598	0.3169
1.163	1	0.3686
3.1545	2.7124	1

附录 1.17 导热系数的单位换算表

瓦/（米 · 开尔文） W/（m · K）	千卡/（米 · 时 · 开尔文） kcal/（m · h · K）	英热单位/（英尺 · 时 · °F） Btu/（ft · h · °F）
1	0.8598	0.5777
1.163	1	0.6719
1.730	1.488	1

附录 1.18 换热系数和传热系数的单位换算表

瓦/（米² · 开尔文） W/（m² · K）	千卡/（米² · 时 · 开尔文） kcal/（m² · h · K）	英热单位/（英尺² · 时 · °F） Btu/（ft² · h · °F）
1	0.8598	0.1761
1.163	1	0.2048
5.678	4.882	1

附录2 常用数学公式及附表

附录2.1 数 学 符 号

符　号	意　义
$=$	等于
$\equiv$	恒等于
$\approx$	近似相等
$\neq$	不等于
$<$	小于
$>$	大于
$\leq$	小于或等于
$\geq$	大于或等于
$\ll$	远小于
$\propto$	成正比
$a:b$	a比b
a^n	a的n次方
$\sqrt{a}$	a开平方
$\sqrt[n]{a}$	a开n次方
$\|a\|$	a的绝对值
$n!$	n的阶乘，即$1\cdot2\cdot3\cdots\cdots n$
$\binom{n}{k}$或C_n^k	二项式系数，即$\frac{n(n-1)\cdots(n-k+1)}{k!}$
Σ	总和号，例：$\sum_{i=1}^{n}x_i=x_1+x_2+\cdots+x_n$
Π	连乘，例：$\prod_{i=1}^{n}x_i=x_1x_2\cdots x_n$
$3.12\dot{3}8\dot{2}$	循环小数，即：3.12382382…
i	虚数单位，$i^2=-1$
%	百分比
∞	无穷大
e	自然对数的底，即：2.7182
π	圆周率，即：3.1415…
$\overline{AB}$	自A至B直线段的长（有时也用AB表示）
$\triangle$	三角形，例：$\triangle ABC$
▱	平行四边形，例▱ABCD
$\perp$	垂直，例：$AB\perp CD$
$\parallel$	平行，例：$AB\parallel CD$
$\sim$	相似，例：$\triangle ABC\sim\triangle DEF$
$\cong$	全同　例：$\triangle ABC\cong\triangle DEF$
$\angle$	平面角，例$\angle BAC$
$^\circ$	度，例：21°
$'$	分，例：21°23′
$''$	秒，例：21°23′18″
⌒	弧，例：$\overset{\frown}{AB}$
$\sin x$	x的正弦
$\cos x$	x的余弦
$\mathrm{tg}x$	x的正切
$\mathrm{ctg}x$	x的余切
$\sec x$	x的正割
$\csc x$	x的余割
$\log_a x$	以a为底的对数

符　号	意　义
$\ln$	以e为底的对数
$\lg x$	以10为底的对数（称为常用对数）
e^x 或 EXPx	指数函数（以e为底）
$f(x)$	x的函数
$erf(z)$	概率积分（或误差函数）
$\phi(z)$	正态概率积分
$erfc(z)$	余概率积分
lim	极限
max	最大
min	最小
Δx	x的有限增量
$\frac{df(x)}{dx}$，$f'(x)$	$f(x)$的导数
$\frac{d^2f(x)}{dx^2}$，$f''(x)$	$f(x)$的二阶导数
$\frac{d^nf(x)}{dx^n}$，$f^{(n)}(x)$	$f(x)$的n阶导数
$\frac{\partial F}{\partial x}$，$F_x$	F对于x的偏导数
$\frac{\partial^2F}{\partial x\partial y}$，$F_{xy}$	F对于x，y的混合偏导数
$\frac{\partial^2F}{\partial x^2}$，$F_{xx}$	F对于x的二阶偏导数
$\frac{\partial^{m+n}F}{\partial x^m\partial y^n}$，$F_{x^my^n}$	先对y求n次偏导数，再对x求m次偏导数
df	f的全微分
Δf	f的差分
$\Delta^2 f$	f的二阶差分
$\Delta^n f$	f的n阶差分
δx	x的变差
$\int_a^b f(x)dx$	$f(x)$对x自a至b的积分
$F(x)\|_a^b$	等于$F(b)-F(a)$
$\mathbf{a}$，$\vec{i}$	矢量（或称向量）
$\overrightarrow{AB}$	矢量（始点为A，终点为B）
$\|a\|$	矢量的模（绝对值，长度）
$a\cdot b$ 或 (ab)	标量积（或内积，点积）
$a\times b$	矢量积（或外积，叉积）
(abc)，$a\cdot(b\times c)$	混合积
gradφ，$\nabla\varphi$	φ的梯度
div$a$ $\nabla\cdot a$	a的散度
rot$a$，$\nabla\times a$	a的旋度
$\frac{\partial\varphi}{\partial l}$	φ的方向导数
$\nabla\varphi$	哈密顿算子
$\Delta\varphi$，$\nabla^2\varphi$	拉普拉斯算子
$A=(a_{ij})$	矩阵（a_{ij}为第i行第j列元素）
$\det A=\|A\|$	方阵A的行列式
rank$A$	矩阵A的秩
tr$A$	矩阵A的迹

附录2.2 代　　数

1.级数

1)〔算术级数〕

$$a_1,\ a_1+d,\ a_1+2d, a_1+3d\cdots \text{（}d\text{为常数）}$$

a_1为级数的首项，d为公差；当$d>0$时级数递增，当$d<0$时级数递减。

通项公式　$a_n=a_1+(n-1)d$

前n项和　$S_n=\dfrac{a_1+a_n}{2}n=na_1+\dfrac{n(n-1)}{2}d$

等差中项　$a_k=\dfrac{a_{k-1}+a_{k+1}}{2}$（$k>1$）

2)〔几何级数〕

$$a_1, a_1q, a_1q^2, a_1q^3\cdots \text{（}q\text{为常数）}$$

a_1为级数首项，q为公比；当$q>1$时级数递增，当$|q|<1$时级数递减。

通项公式　$a_n=a_1q^{n-1}$

前n项和　$S_n=\dfrac{a_1(1-q^n)}{1-q}=\dfrac{d_1-a_nq}{1-q}$

等比中项　$a_k=\pm\sqrt{a_{k-1}a_{k+1}}$（$a_{k-1}a_{k+1}>0$）

无穷递减等比级数的和　$S=\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_1q^{n-1}=\dfrac{a_1}{1-q}(|q|<1)$

2.乘法与因式分解公式

$(x+a)(x+b)=x^2+(a+b)x+ab$

$(a\pm b)^2=a^2\pm 2ab+b^2$

$(a\pm b)^3=a^3\pm 3a^2b+3ab^2\pm b^2$

$(a^2-b^2)=(a-b)(a+b)$

$a^3\pm b^3=(a\pm b)(a^2\mp ab+b^2)$

$(a+b+c)^2=a^2+b^2+c^2+2ab+2bc+2ca$

3.分式运算

$\dfrac{a}{b}\pm\dfrac{c}{b}=\dfrac{a+c}{b}$　　$\dfrac{a}{b}\pm\dfrac{c}{d}=\dfrac{ad\pm bc}{bd}$

$\dfrac{a}{b}\cdot\dfrac{c}{d}=\dfrac{ac}{bd}$　　$\dfrac{a}{b}\div\dfrac{c}{d}=\dfrac{ad}{bc}$

$\left(\dfrac{a}{b}\right)^n=\dfrac{a^n}{b^n}$　　$\sqrt[n]{\dfrac{a}{b}}=\dfrac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}}(a>0,b>0)$

4.比例

若$\dfrac{a}{b}=\dfrac{c}{d}$（或写为$a:b=c:d$）$a,b,c,d$都不等于零。

则有　$ad=bc$（交叉积）　　$\dfrac{b}{a}=\dfrac{d}{c}$（反比）

$\dfrac{a}{c}=\dfrac{b}{d}$（更比）　　$\dfrac{a+b}{b}=\dfrac{c+d}{d}$（合比）

$\dfrac{a-b}{b}=\dfrac{c-d}{d}$（分比）　　$\dfrac{a+b}{a-b}=\dfrac{c+d}{c-d}$（合分比）

5. 乘方和开方运算

运　　算	规　　则
积的乘方	$(abc\cdots)^n = a^n b^n c^n \cdots$
商（分式）的乘方	$\left(\frac{a}{b}\right)^n = \frac{a^n}{b^n}$
底相同的乘方的乘法	$a^m a^n = a^{m+n}$
底相同的乘方的除法	$a^m \div a^n = a^{m-n}$
乘方的乘方	$(a^m)^n = a^{mn}$
积的开方	$\sqrt[n]{abc} = \sqrt[n]{a}\sqrt[n]{b}\sqrt[n]{c}$
商的开方	$\sqrt[n]{\frac{a}{b}} = \frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}}$
指数相同的开方的乘法	$\sqrt[n]{a}\sqrt[n]{b}\sqrt[n]{c} = \sqrt[n]{abc}$
指数相同的开方的除法	$\frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}} = \sqrt[n]{\frac{a}{b}}$
开方的乘方	$(\sqrt[n]{a})^p = \sqrt[n]{a^p}$
乘方的开方	$\sqrt[n]{a^p} = (\sqrt[n]{a})^p$
开方的开方	$\sqrt[p]{\sqrt[n]{a}} = \sqrt[np]{a}$

6. 阶乘、排列与组合

1) 阶乘

阶乘的定义：设n为自然数，则

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots n$$

称为n的阶乘，并且规定 $0! = 1$，又定义

$$(2n+1)!! = \frac{(2n+1)!}{2^n n!} = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n+1), (-1)!! = 0$$

$$(2n)!! = 2^n n! = 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots (2n), 0!! = 0$$

2) 排列

选排列：从n个不同的元素中，每次取出k个（$k \leq n$）不同的元素，按一定的顺序排成一列，称为选排列，其排列种数为

$$A_n^k = n(n-1)(n-2)\cdots(n-k+1) = \frac{n!}{(n-k)!}$$

全排列：从n个不同的元素中，每次取出k个元素，按一定的顺序排成一列，称为全排列，其排列种数为

$$P_n = A_n^n = n(n-1)(n-2)\cdots 3 \cdot 2 \cdot 1 = n!$$

有重复的排列：从n个不同的元素中，每次取出k个元素（$k \leq n$），允许重复，这种排列称为有重复的排列，其排列种数为

$$A_n^{\tilde{k}} = n^k \qquad A_n^{\tilde{n}} = n^n$$

不尽相异元素的全排列：如果在n个元素中，有n_1个元素彼此相同，又有n_2个元素彼此相同，…，又有n_m个元素彼此相同($n_1 + n_2 + \cdots + n_m = n$)，那末这$n$个元素的全排列称为不尽相异元素的全排列，其排列种数为

$$A_{n(n_1, n_2 \cdots, n_m)}^n = \frac{n!}{n_1! \ n_2! \ \cdots n_m!}$$

环状排列：从n个不同元素中，每次取出k个元素，仅按元素之间的相对位置而不分首尾地围成一圈，这种排列称为环状排列，其排列种数为

$$A_n^{\textcircled{k}}=\frac{A_n^k}{k}$$

3)组合

通常意义下的组合：从n个不同的元素中，每次取出k个不同的元素，不管其顺序合并成一组，称为组合，其组合数为

$$C_n^k=\frac{A_n^k}{k!}=\frac{n!}{(n-k)!\ \ k!}\qquad (C_n^k \text{ 也记作} \binom{n}{k}\text{并且规定} C_n^0=1$$

多组组合：把n个不同的元素分成m组，第i组有n_i个不同的元素，即$n_1+n_2+\cdots+n_m=n$,这样分组的种数为

$$C_n^{n_1,n_2\cdots,n_m}=\frac{n!}{n_1!\ \ n_2!\ \ \cdots n_m!}$$

通常意义下的组合是其特例。

有重复的组合：从n个不同元素中，每次取出k个元素，允许重复，不管其顺序合并成一组，这种组合称为有重复的组合，其组合数为

$$C_n^{\tilde{k}}=C_{n+k-1}^k$$

7.牛顿二项式

在n为正整数的情形下，$(a+b)^n$的表达式为

$$(a+b)^n=a^n+na^{n-1}b+\frac{n(n-1)}{2!}a^{n-2}b^2+\cdots+$$
$$\frac{n(n-1)(n-2)\cdots(n-k+1)}{k!}a^{n-k}b^k+\cdots+$$
$$nab^{n-1}+b^n$$

或

$$(a+b)^n=C_n^0a^n+C_n^1a^{n-1}b+C_n^2a^{n-2}b^2+\cdots+C_n^ka^{n-k}b^k+\cdots+C_n^{n-1}ab^{n-1}+C_n^nb^n。$$

8.复数

1)代数形式：$a+bi$,a为复数的实部，b为复数的虚部，其中$i=\sqrt{-1}$，称为虚数。

2)三角形式：$r(\cos\varphi+\sin\varphi)$;$r$为复数的模或绝对值($r\geq0$);$\varphi$为辐角。各值之间有如下关系：

$$a=r\cos\varphi,b=r\sin\varphi,r=\sqrt{a^2+b^2},\mathrm{tg}\varphi=\frac{b}{a}。$$

3)共轭复数：两个复数$a_1+b_1i=r(\cos\varphi_1+i\sin\varphi_1)$和$a_2+b_2i=r_2(\cos\varphi_2+i\sin\varphi_2)$,若$a_2=a_1,b_2=-b_1$（即$r_2=r_1,\varphi_2=-\varphi_1$),则称为共轭复数。

4)复数的加法公式

$$(a_1+b_1i)\pm(a_2+b_2i)=(a_1\pm a_2)+(b_1\pm b_2)i$$
$$(a+bi)+(a-bi)=2a$$

5)复数的乘法公式

$$(a_1+b_1i)(a_2+b_2i)=(a_1a_2-b_1b_2)+(a_1b_2+a_2b_1)i$$

或由三角形式表示为

$$[r_1(\cos\varphi_1+i\sin\varphi_1)]\ [r_2(\cos\varphi_2+i\sin\varphi_2)]$$
$$=r_1r_2\ [\cos(\varphi_1+\varphi_2)+i\sin(\varphi_1+\varphi_2)]$$
$$(a+bi)(a-bi)=a^2+b^2$$

6)复数的除法公式

$$\frac{a_1+b_1 i}{a_1+b_2 i}=\frac{(a_1a_2+b_1b_2)+(a_2b_1-a_1b_2)i}{a_2^2+b_2^2}$$

或
$$\frac{r_1(\cos\varphi_1+i\sin\varphi_1)}{r_2(\cos\varphi_2+i\sin\varphi_2)}=\frac{r_1}{r_2}[\cos(\varphi_1-\varphi_2)+i\sin(\varphi_1-\varphi_2)]$$

复数的乘方公式

$$[r(\cos\varphi+i\sin\varphi)]^n=r^n(\cos n\varphi+i\sin n\varphi)$$ (德・莫弗公式)

$i^{4m}=1;i^{4m+1}=i;i^{4m+2}=-1\quad i^{4m+3}=-i$($m$ 是整数);

7) 复数的开方公式

$$\sqrt[n]{r(\cos\varphi+i\sin\varphi)}=\sqrt[n]{r}\left(\cos\frac{\varphi+2k\pi}{n}+i\sin\frac{\varphi+2k\pi}{n}\right)$$

其中$k=0,1,2,3,\cdots,n-1$。

9. 对数的运算规则

乘积的对数 $\log_a xy=\log_a x+\log_a y$

商的对数 $\log_a\frac{x}{y}=\log_a x-\log_a y$

乘方的对数 $\log_a x^n=n\log_a x$

方根的对数 $\log_a\sqrt[n]{x}=\frac{1}{n}\log x$

换底公式 $\log_a y=\frac{\log_b y}{\log_b a}$

附录 2.3 三角函数

1. 和角、差角、倍角和半角的三角函数

$\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cos\beta\pm\cos\alpha\sin\beta$;

$\cos(\alpha\pm\beta)=\cos\alpha\cos\beta\mp\sin\alpha\sin\beta$;

$\mathrm{tg}(\alpha\pm\beta)=\frac{\mathrm{tg}\alpha\pm\mathrm{tg}\beta}{1\mp\mathrm{tg}\alpha\mathrm{tg}\beta}$;$\mathrm{ctg}(\alpha\pm\beta)=\frac{\mathrm{ctg}\alpha\mathrm{ctg}\beta\mp1}{\mathrm{ctg}\beta\pm\mathrm{ctg}\alpha}$;

$\sin2\alpha=2\sin\alpha\cos\alpha$

$\cos2\alpha=\cos^2\alpha-\sin^2\alpha=2\cos^2\alpha-1=1-2\sin^2\alpha$

$\mathrm{tg}^2\alpha=\frac{2\mathrm{tg}\alpha}{1-\mathrm{tg}^2\alpha}=\frac{2}{\mathrm{ctg}\alpha-\mathrm{tg}\alpha}$;

$\mathrm{ctg}2\alpha=\frac{\mathrm{ctg}^2\alpha-1}{2\mathrm{ctg}\alpha}=\frac{\mathrm{ctg}\alpha-\mathrm{tg}\alpha}{2}$;

$\sin\frac{\alpha}{2}=\pm\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{2}}$;$\cos\frac{\alpha}{2}=\pm\sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}}$;

$\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}=\pm\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{1+\cos\alpha}}=\frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha}=\frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha}$;

2. 三角函数的乘积与乘方:

$\sin\alpha\cdot\sin\beta=\frac{1}{2}[\cos(\alpha-\beta)-\cos(\alpha+\beta)]$;

$\cos\alpha\cos\beta=\frac{1}{2}[\cos(\alpha-\beta)+\cos(\alpha+\beta)]$;

$\sin\alpha\cdot\cos\beta=\frac{1}{2}[\sin(\alpha-\beta)+\sin(\alpha+\beta)]$;

$\sin^2\alpha=\frac{1-\cos2\alpha}{2}$;$\cos^2\alpha=\frac{1+\cos2\alpha}{2}$;

3.三角函数的和及差

$\sin\alpha+\sin\beta=2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$;

$\sin\alpha-\sin\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$;

$\cos\alpha+\cos\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$;

$\cos\alpha-\cos\beta=-2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$;

$\mathrm{tg}\alpha\pm\mathrm{tg}\beta=\frac{\sin(\alpha\pm\beta)}{\cos\alpha\cdot\cos\beta}$;$\mathrm{ctg}\alpha\pm\mathrm{ctg}\beta=\frac{\sin(\beta\pm\alpha)}{\sin\alpha\cdot\sin\beta}$;

附录2.4 几　何

几何图形面积——S，体积——V

图　形	记　号	公　式
三角形 (b, c, h, φ, a)	a,b,c——边 h——高 P——半周长	$S=\frac{1}{2}ah$　$S=\frac{1}{2}ab\sin\varphi$ $S=\sqrt{P(P-a)(P-b)(P-c)}$ 式中　$P=\frac{a+b+c}{2}$
菱形 (d_1, d_2, h, φ, a)	a——边 φ——菱形的角 d_1,d_2——对角线 h——高	$S=ah$ $S=a^2\sin\varphi$ $S=\frac{d_1d_2}{2}$
梯形 (a_1, d_2, d_1, h, φ, a_2)	a_1,a_2——底边 d_1,d_2——对角线 φ——对角线夹角 h——高	$S=\frac{(a_1+a_2)h}{2}$ $S=\frac{1}{2}d_1d_2\sin\varphi$

续上表

图形	记号	公式
平行四边形	a,b——边 h——两对边b之间的距离 φ——平行四边形的角 d_1,d_2——对角线	$S=a^2\sin\varphi$ $S=\frac{1}{2}d_1d_2$
正多边形	n——边数 a——边 R——外接圆半径 r——内接圆半径 α——圆心角	$a=2R\sin\frac{\alpha}{2}=2r\text{tg}\frac{\alpha}{2}$ $S=nR^2\sin\alpha$ $S=nr^2\text{tg}\frac{\alpha}{2}$
圆环	r——内半径 R——外半径 d——内直径 D——外直径 $\rho=\frac{r+R}{2}$——平均半径 $\delta=R-r$——环宽 φ——部分圆环的中心角。	$S=\pi(R^2-r^2)=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)$ $=2\pi\rho\delta$ 部分圆环面积 $S=\frac{\pi\varphi}{360}(R^2-r^2)=\frac{\pi\varphi}{90}(D^2-d^2)$
弓形	r——半径 φ——中心角 $l=\frac{\pi\varphi}{180}r$——弧长 a——弦长 h——高	$S=\frac{1}{2}r^2\left(\frac{\pi\varphi}{180}-\sin\varphi\right)$ $=\frac{r(l-a)+ah}{2}$
扇形	r——半径 φ——中心角 $l=\frac{\pi\varphi}{180}r$——弧长	$S=\frac{1}{2}lr=\frac{\pi r^2\varphi}{360}\approx0.00873r^2\varphi$

续上表

图　形	记　号	公　式
直棱柱	V——体积 S_1——底面积 S_3——侧面积 H——高 P——底边周长	$S_3=PH$ $V=S_1\cdot H$
正棱锥	记号同上 A——斜高	$S_3=\frac{1}{2}PA$ $V=\frac{1}{3}S_1\cdot H$
正棱台	P_1,P_2——上、下底的周长 A——斜高 S_1,S_2——上，下底面积	$S_3=\frac{1}{2}(P_1+P_2)A$ $V=\frac{1}{3}(S_1+S_2+\sqrt{S_1S_2})H$
圆锥 l H R	R——底面半径 h——高 $l=\sqrt{R^2+H^2}$——母线	$S_3=\pi Rl$ $S=\pi R(l+R)$ $V=\frac{1}{3}\pi R^2H$
圆台 R_2 l H R_1	R_1,R_2——底面半径 H——高 l——母线	$S_3=\pi(R_1+R_2)l$ $S=\pi R_1(l+R_1)+\pi R_2(l+R)$ $V=\frac{1}{3}\pi H(R_2^2+R_1^2+R_1R_2)$

图形	记号	公式
球	R——半径 D——直径	$S=4\pi R^2=\pi D^2$ $V=\frac{4}{3}\pi R^3=\frac{1}{6}\pi D^3$
球缺	S_σ——球冠侧面积 S——全面积	$S_\sigma=2\pi Rh=\pi(r^2+h^2)$ $S=\pi(2r^2+h^2)$ $V=\frac{1}{6}\pi h(3r^2+h^2)$
球扇形		$S=\pi R(r+2h)$ $V=\frac{2}{3}\pi R^2 h$
球台		$S_s=2\pi Rh$ $S=\pi(2Rh+r_1^2+r_2^2)$, $V=\frac{1}{6}\pi h\,[3(r_1^2+r_2^2)+h^2]$

附录2.5 微积分学

1. 导数与微分 函数的改变量与自变量的改变量之比，当自变量的改变量趋于零时的极限称为函数 $y=f(x)$ 的导数

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x}=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{f(x+\Delta x)-f(x)}{\Delta x}。$$

导数的各种记号如下：y', y'_x, $f'(x)$, $\frac{dy}{dx}$, $\frac{d}{dx}f(x)$。

求函数的导数称为函数的微分法。

二阶导数的记号是：y'',$f''(x)$,$\frac{d^2y}{dx^2}$。依此可以定义任意阶导数。n阶导数的记号是：$y^{(n)}$，$f(x)^{(n)}$,$\frac{d^ny}{dx^n}$。

函数$y=f(x)$的导数与自变量的乘积称为函数的微分〔记号为：dy;$df(x)$〕：

$$dy=f'(x)\Delta x=y'\Delta x。$$

2. 微分法规划　若u,v是自变量x的函数，对x进行微分，则：

1) $(u\pm v)'=u'\pm v'$　（和的导数）；

2) $(uv)'=u'v+uv'$（积的导数）；

3) $\left(\frac{u}{v}\right)'=\frac{vu'-uv'}{v^2}$（商的导数）；

4) $(u^v)'=vu^{v-1}u'+u^v\ln u\cdot v'$（一般指数函数的导数）；

5) 若$y=f(u)$而$u=\phi(x)$,则$\frac{dy}{dx}=\frac{dy}{du}\cdot\frac{du}{dx}$（复合函数的微分规则）。

3. 偏导数　函数$u=f(x,y,z,\cdots)$的各个自变量（除x外）都假定为常数计算而得的导数，称这函数对自变量x的偏导数：

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{f(x+\Delta x,y,z,\cdots)-f(x,y,z\cdots)}{\Delta x}$$

对x的偏导数可记为：$\frac{\partial u}{\partial x}$，$\frac{\partial f}{\partial x}$，$f'_x$，$\frac{\partial}{\partial x}f(x,y,z\cdots)$。对其他自变量的偏导数，可用类似方法定义和表示。

高阶偏导数的定义及表示方法如下：$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)=\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}=f''_{xx}$，$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)=\frac{\partial^2 f}{\partial x\partial y}=f''_{xy}$等等。

4. 全微分　若函数$z=f(x,y,\cdots)$有连续的偏导数 $f'_x(x,y,\cdots)$,$f'_y(x,y,\cdots)$,$\cdots$,则表达式$dz=f'_x(x,y,\cdots)\Delta x+f'_y(x,y,\cdots)\Delta y+\cdots$称为这个函数的全微分，其中$\Delta x$,$\Delta y$,$\cdots$是自变量的改变量。

5. 复合函数和隐函数的微分　若$z=f(x,y,\cdots)$而$x=\varphi_1(u,v,\cdots)$;$y=\varphi_2(u,v,\cdots)\cdots$,则

$$\frac{\partial z}{\partial u}=\frac{\partial f}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial u}+\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial u}+\cdots,$$

$$\frac{\partial z}{\partial v}=\frac{\partial f}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial v}+\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial v}+\cdots$$

特别，若 $x=\varphi_1(t)$,$y=\varphi_2(t)$,$\cdots$，则

$$\frac{dz}{dt}=\frac{\partial z}{\partial x}\frac{dx}{dt}+\frac{\partial z}{\partial y}\frac{dy}{dt}+\cdots$$

6. 函数积分法则

1) $\int[f_1(x)\pm f_2(x)]dx=\int f_1(x)\,dx\pm\int f_2(x)\,dx$　（和的积分）

2) $\int af(x)\,dx=a\int f(x)\,dx$　（常数因子a提出积分号外）

3) $\int u(x)\,dv(x)=u(x)v(x)-\int v(x)\,du(x)$　（分部积分法）

4) 若$x=\varphi(t)$,则$\int f(x)\,dx=\int f[\varphi(t)]\varphi'(t)\,dt$　（变量代换法或替代法）。

7. 定积分的性质

1) $\int_a^b dx=b-a$;

2) $\int_a^b f(x)dx=-\int_b^a f(x)dx$;

3) $\int_a^b f(x)dx+\int_b^c f(x)dx=\int_a^c f(x)dx$;

4) $\int_a^b kf(x)dx=k\int_a^b f(x)dx$ （k为常数）

5) $\int_a^b [f_1(x)\pm f_2(x)]dx=\int_a^b f_1(x)dx\pm\int_a^b f_2(x)dx$

8. 基本初等函数导数表

函数y	导数$\frac{dy}{dx}$	函数y	函数$\frac{dy}{dx}$
C(const)	0	$\mathrm{cosec}x$	$-\frac{\cos x}{\sin^2 x}=-\mathrm{ctg}x\,\mathrm{cosec}x$
x	1	$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
x^n	nx^{n-1}	$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$	$\mathrm{arctg}x$	$\frac{1}{1+x^2}$
$\frac{1}{x^n}$	$-\frac{n}{x^{n+1}}$	$\mathrm{arcctg}x$	$-\frac{1}{1+x^2}$
$\sqrt{x}$	$\frac{1}{2\sqrt{x}}$	$\mathrm{arcsec}x$	$\frac{1}{x\sqrt{x^2-1}}$
$\sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n\sqrt[n]{x^{n-1}}}$	$\mathrm{arccosec}x$	$-\frac{1}{x\sqrt{x^2-1}}$
e^x	e^x	$\mathrm{sh}x$	$\mathrm{ch}x$
e^{kx}	ke^{kx}	$\mathrm{th}x$	$\frac{1}{\mathrm{ch}^2 x}$
a^x	$a^x\ln a$	$\mathrm{cth}x$	$-\frac{1}{\mathrm{sh}^2 x}$
a^{kx}	$ka^{kx}\ln a$	$\mathrm{Arsh}x$	$\frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$	$\mathrm{Arch}x$	$\pm\frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$
$\log_a x$	$\frac{1}{x}\log_a e=\frac{1}{x\ln a}$	$\mathrm{Arth}x$	$\frac{1}{1-x^2}$
$\lg x$	$\frac{1}{x}\lg e\approx\frac{0.4343}{x}$	$\mathrm{Arcth}x$	$-\frac{1}{x^2-1}$
$\sin x$	$\cos x$		
$\cos x$	$-\sin x$		
$\mathrm{tg}x$	$\frac{1}{\cos^2 x}=\sec^2 x$		
$\mathrm{ctg}x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}=-\mathrm{cosec}^2 x$		
$\sec x$	$\frac{\sin x}{\cos^2 x}=\mathrm{tg}x\sec x$		

9. 基本积分表①

1) $\int dx=x$;

2) $\int x^n dx=\frac{x^{n+1}}{n+1}(n\neq-1)$;

3) $\int\frac{dx}{x}=\ln x$②;

① 这里和以下各表中略去任意常数。

② 对$f(x)$应理解为$\ln|f(x)|$；绝对值符号均省略。

4) $\int\frac{dx}{x^2+a^2}=\frac{1}{a}\text{arctg}\frac{x}{a}$;

5) $\int\frac{dx}{x^2-a^2}=\frac{1}{2a}\ln\frac{x-a}{x+a}=\begin{cases}-\frac{1}{a}\text{Arth}\frac{x}{a},\text{若}|x|<a;\\-\frac{1}{a}\text{Arcth}\frac{x}{a},\text{若}|x|>a;\end{cases}$

6) $\int\frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}}=\arcsin\frac{x}{a}$;

7) $\int\frac{dx}{\sqrt{x^2+a}}=\ln(x+\sqrt{x^2+a})\ =\begin{cases}\text{Arsh}\frac{x}{\sqrt{a}},\text{若}\,a>0;\\\text{Arch}\frac{x}{\sqrt{-a}},\text{若}<0;\end{cases}$

8) $\int e^x dx=e^x$;

9) $\int a^x dx=\frac{a^x}{\ln a}$;

10) $\int\sin x dx=-\cos x$;

11) $\int\cos x dx=\sin x$;

12) $\int\text{tg}x dx=-\ln\cos x$;

13) $\int\text{ctg}x dx=\ln\sin x$;

14) $\int\frac{dx}{\sin x}=\ln\text{tg}\frac{x}{2}$;

15) $\int\frac{dx}{\cos x}=\ln\text{tg}\left(\frac{x}{2}+\frac{\pi}{4}\right)$;

16) $\int\frac{dx}{\sin^2 x}=-\text{ctg}x$;

17) $\int\frac{dx}{\cos^2 x}=\text{tg}x$;

18) $\int\text{sh}x dx=\text{ch}x$;

19) $\text{ch}x dx=\text{sh}x$;

20) $\int\text{th}x dx=\ln\text{ch}x$;

21) $\int\text{cth}x dx=\ln\text{sh}x$;

22) $\int\frac{dx}{\text{sh}^2 x}=-\text{cth}x$;

23) $\int\frac{dx}{\text{ch}^2 x}=\text{th}x$。

附录 2.6　矢量算法与场论初步

1. 矢量算法

1)矢量　具有大小和方向的量称矢量。矢量$\vec{a}$的坐标表示为$\vec{a}=a_x\vec{i}+a_y\vec{j}+a_z\vec{k}=(a_x,a_y,a_z)$其中$\vec{i},\vec{j},\vec{k}$为单位矢量。$\vec{a}$的长度（或模）$|\vec{a}|=a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}$。

2)加减法运算规律

$\vec{a}+\vec{b}=\vec{b}+\vec{a}$　　（交换律）

$\vec{a}+(\vec{b}+\vec{c})=(\vec{a}+\vec{b})+\vec{c}$（结合律）

$\vec{a}\pm\vec{b}=(a_x\pm b_x,a_y\pm b_y,a_z\pm b_z)$

3)标量积（点积、内积）

设$\vec{a}=(a_x,a_y,a_z),\vec{b}=(b_x,b_y,b_z),|\vec{a}|=a$　$|\vec{b}|=b,\vec{a},\vec{b}$两矢量的夹角为$\theta$，则矢量$\vec{a},\vec{b}$的标量积为

$\vec{a}\cdot\vec{b}=ab\cos\theta$　　$(0\leq\theta\leq\pi)$

标量积运算适合以下的规律

$\vec{a}\cdot\vec{b}=\vec{b}\cdot\vec{a}$　　（交换律）

$\vec{a}\cdot(\vec{b}+\vec{c})=\vec{a}\cdot\vec{b}+\vec{a}\cdot\vec{c}$（分配律）

$\vec{i}\cdot\vec{i}=\vec{j}\cdot\vec{j}=\vec{k}\cdot\vec{k}=1$　$\vec{i}\cdot\vec{j}=\vec{j}\cdot\vec{k}=\vec{k}\cdot\vec{i}=0$

$\vec{a}\cdot\vec{b}=a_xb_x+a_yb_y+a_zb_z$

4)矢量积（叉积，外积）

设$\vec{a}=(a_x,a_y,a_z),\vec{b}=(b_x,b_y,b_z),\vec{a},\vec{b}$两矢量的夹角为$\theta$，则$\vec{a}$和$\vec{b}$的矢量积用符号$\vec{a}\times\vec{b}$表示，并定义它为另一矢量$\vec{c}$，即

$$\vec{c}=\vec{a}\times\vec{b}=\begin{vmatrix}\vec{i}&\vec{j}&\vec{k}\\a_x&a_y&a_z\\b_x&b_y&b_z\end{vmatrix}$$

$=(a_yb_z-a_zb_y)\vec{i}+(a_zb_x-a_xb_z)\vec{j}+(a_xb_y-a_yb_x)\vec{k}$矢量$\vec{c}$的大小

$c=ab\sin\theta$

矢量c的方向垂直于$\vec{a}$和$\vec{b}$所在的平面，其指向用右手螺旋法则确定。

矢量积运算规律

$\vec{a}\times\vec{b}=-\vec{b}\times\vec{a}$　　（反交换律）

$(\vec{a}+\vec{b})\times\vec{c}=\vec{a}\times\vec{c}+\vec{b}\times\vec{c}$　（分配律，次序不能交换）

$(\lambda\vec{a})\times(\mu\vec{b})=\lambda\mu(\vec{a}\times\vec{b})$

$\vec{i}\times\vec{i}=\vec{j}\times\vec{j}=\vec{k}\times\vec{k}=0$　$\vec{i}\times\vec{j}=\vec{k},\vec{j}\times\vec{k}=\vec{i},\vec{k}\times\vec{i}=\vec{j}$

2. 矢量分析

1)矢函数　对于自变量t（标量）的每一个数值都有变动矢量$\vec{a}$的确定量和它对应，则变矢量$\vec{a}$称为变量t的矢函数，记作$\vec{a}=\vec{f}(t)$，矢函数也可表为

$\vec{a}=a_x\vec{i}+a_y\vec{j}+a_z\vec{k}$

式中　$a_x=f_x(t),a_y=f_y(t),a_z=f_z(t)$

为三个标函数。

2)矢函数求导公式

$$\frac{d\vec{c}}{dt}=0 \qquad (\vec{c}\text{为常矢量})$$

$$\frac{d}{dt}(k\vec{a})=k\frac{d\vec{a}}{dt} \qquad (k\text{为常数})$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a}+\vec{b}+\vec{c})=\frac{d\vec{a}}{dt}+\frac{d\vec{b}}{dt}+\frac{d\vec{c}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(\varphi\vec{a})=\frac{d\varphi}{dt}\vec{a}+\varphi\frac{d\vec{a}}{dt} \qquad (\varphi\text{是}t\text{的标函数})$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a}\cdot\vec{b})=\frac{d\vec{a}}{dt}\vec{b}+\vec{a}\frac{d\vec{b}}{dt} \qquad (\text{顺序可以交换})$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a}\times\vec{b})=\frac{d\vec{a}}{dt}\times\vec{b}+\vec{a}\times\frac{d\vec{b}}{dt} \qquad (\text{顺序不可以交换})$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{a}\,\vec{b}\,\vec{c})=\left(\frac{d\vec{a}}{dt}\vec{b}\,\vec{c}\right)+\left(\vec{a}\frac{d\vec{b}}{dt}\vec{c}\right)+\left(\vec{a}\,\vec{b}\frac{d\vec{c}}{dt}\right) \qquad (\text{顺序不可以交换})$$

$$\frac{d}{dt}\vec{a}\,[\varphi(t)]=\frac{d\vec{a}}{d\varphi}\frac{d\varphi}{dt}$$

（φ是t的标函数，这是复合函数的求导公式）

3. 场论

1)梯度

$$\text{grad}\varphi=\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x},\frac{\partial\varphi}{\partial y},\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)=\nabla\varphi$$

$$=\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j}+\frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}$$

式中 $\nabla=\vec{i}\frac{\partial}{\partial x}+\vec{i}\frac{\partial}{\partial y}+\vec{k}\frac{\partial}{\partial z}$称为哈密顿算子，grad$\varphi$有的书刊中记作del$\varphi$。

梯度具有性质

$\text{grad}(\lambda\varphi+\mu\psi)=\lambda\text{grad}\varphi+\mu\text{grad}\psi$（$\lambda,\mu$ 为常数）

$\text{grad}(\varphi\psi)=\varphi\text{grad}\psi+\psi\text{grad}\varphi$

$\text{grad}F(\varphi)=F'(\varphi)\text{grad}\varphi$

方向导数

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\vec{l}}=\vec{l}\,\text{grad}\varphi=\frac{\partial\varphi}{\partial x}\cos\alpha+\frac{\partial\varphi}{\partial y}\cos\beta+\frac{\partial\varphi}{\partial z}\cos\gamma$$

式中$\vec{l}=(\cos\alpha,\cos\beta,\cos\gamma)$为方向$\vec{l}$的单位矢量，$\alpha,\beta,\gamma$为其方向角。

2)散度

$$\text{div}\vec{R}=\frac{\partial X}{\partial x}+\frac{\partial Y}{\partial y}+\frac{\partial Z}{\partial z}=\nabla\cdot R=\text{div}(X,Y,Z)$$

式中∇为哈密顿算子。

散度具有性质

$\text{div}(\lambda\vec{a}+\mu\vec{b})=\lambda\text{div}\vec{a}+\mu\text{div}\vec{b}$（$\lambda,\mu$为常数）

$\text{div}(\varphi\vec{a})=\varphi\text{div}\vec{a}+\vec{a}\,\text{grad}\varphi$

$\text{div}(\vec{a}\times\vec{b})=\vec{b}\cdot\text{rot}\,\vec{a}-\vec{a}\cdot\text{rot}\,\vec{b}$

3)旋度

$$\text{rot}\vec{R}=\left(\frac{\partial Z}{\partial y}-\frac{\partial Y}{\partial z}\right)\vec{i}+\left(\frac{\partial Y}{\partial Z}-\frac{\partial Z}{\partial y}\right)\vec{j}+\left(\frac{\partial Y}{\partial x}-\frac{\partial X}{\partial y}\right)\vec{k}$$

$$=\nabla\times R=\begin{vmatrix}\vec{i} & \vec{j} & \vec{k}\\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z}\\ X & Y & Z\end{vmatrix}$$

式中∇为哈密顿算子，旋度也称涡度，$\text{rot}\vec{R}$有的书刊中记作$\text{Curl}\vec{R}$。

旋度具有性质

$\text{rot}(\lambda\vec{a}+\mu\vec{b}) =\lambda\text{rot}\vec{a}+\mu\text{rot}\vec{b}$ （λ,μ为常数）

$\text{rot}(\varphi\vec{a}) =\varphi\text{rot}\vec{a}+\vec{a}\times\text{grad}\varphi$

$\text{rot}(\vec{a}\times\vec{b})=(\vec{b}\cdot\nabla)\vec{a}-(\vec{a}\cdot\nabla)\vec{b}+(\text{div}\vec{b})\vec{a}-(\text{div}\vec{a})\vec{b}$

4)梯度、散度、旋度混合运算

$\text{div rot}\vec{R}=0$

$\text{rot grad}\varphi=0$

$\text{div grad}\varphi=\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=\triangle\varphi$

$\text{grad div}\vec{R}=\nabla(\nabla\vec{R})$

$\text{rot rot}\vec{R}=\nabla\times(\nabla\times\vec{R})$

$\text{div grad}(\lambda\varphi+\mu\phi)=\lambda\text{div grad}\varphi+\mu\text{div grad}\phi$ （λ,μ为常数）

$\text{div grad}(\varphi\phi)=\varphi\text{div grad}\phi+\phi\text{div grad}\varphi+2\,\text{grad}\varphi\cdot\text{grad}\varphi$

$\text{grad div}\vec{R}-\text{rot rot}\vec{R}=\triangle\vec{R}$

式中∇为哈密顿算子，$\triangle=\nabla\cdot\nabla=\nabla^2$为拉普拉斯算子。

附录2.7 数 学 表

1.某些常见的常数

常数	n	$\lg n$	常数	n	$\lg n$
π	3.14159	0.49715	$\sqrt{e}$	1.64872	0.21715
2π	6.28319	0.79818	$\sqrt[3]{e}$	1.39561	0.14476
3π	9.42478	0.97427	$1:e$	0.36788	$\bar{1}$.56571
4π	12.56637	1.09921	$1:e^2$	0.13533	$\bar{1}$.13141
6π	18.84956	1.27530	$\sqrt{1:e}$	0.60653	$\bar{1}$.78285
$4\pi:3$	4.18879	0.62209	$\sqrt[3]{1:e}$	0.71653	$\bar{1}$.85524
$\pi:2$	1.57080	0.19612	$\lg e$	0.43429	$\bar{1}$.63778
$\pi:3$	1.04720	0.02003	$\ln 10$	2.30258	0.36222
$\pi:4$	0.78540	$\bar{1}$.89509	$\ln\pi$	1.14473	0.05870
$\pi:6$	0.52360	$\bar{1}$.71900	g①	9.81	0.99167
$\pi:180$	0.01745	$\bar{2}$.24188	g^2	96.2361	1.98334
$2:\pi$	0.63662	$\bar{1}$.80388	$\sqrt{g}$	3.13209	0.49583
$180:\pi$	57.29578	1.75812	$\sqrt{2g}$	4.42945	0.64635
$10800:\pi$	3437.747	3.53627	$1:g$	0.10194	$\bar{1}$.00833
$648000:\pi$	206264.81	5.31443	$1:2g$	0.05097	$\bar{2}$.70730
$1:\pi$	0.31831	$\bar{1}$.50825	$\pi\sqrt{g}$	9.83976	0.99298
$1:2\pi$	0.15916	$\bar{1}$.20182	$\pi\sqrt{2g}$	13.91552	1.14350
$1:3\pi$	0.10610	$\bar{1}$.02573	2!	2	

续上表

常　数	n	$\lg n$	常　数	n	$\lg n$
$1:4\pi$	0.07958	$\bar{2}.90079$	3!	6	
π^2	9.86960	0.99430	4!	24	
$2\pi^2$	19.73921	1.29533	5!	120	
$\sqrt{\pi}$	1.77245	0.24857	6!	720	
$\sqrt[3]{\pi}$	1.46459	0.16572	7!	5040	
$1:\pi^2$	0.10132	$\bar{1}.00570$	8!	40320	
$1:\sqrt{\pi}$	0.56419	$\bar{1}.75143$	9!	362880	
$\sqrt{2\pi}$	2.50663	0.39909	10!	3628800	
$\sqrt{\pi:2}$	1.25331	0.09806	11!	39916800	
$\sqrt{2:\pi}$	0.79788	$\bar{1}.90194$	12!	479001600	
e	2.71828	0.43429	C②	0.57722	1.76134
e^2	7.38906	0.86859			

① 这里给出纬度45°～50°海平面处的g值（m/s^2），尾数已舍去。

② C为欧拉常数。

2. 三角函数表

角度	正　弦	正　切		角度	正　弦	正　切		角度	正　弦	正　切	
1	0.0175	0.0175	89	31	0.5150	0.6009	59	61	0.8746	1.804	29
2	0.0349	0.0349	88	32	0.5299	0.6249	58	62	0.8829	1.881	28
3	0.0523	0.0524	87	33	0.5446	0.6494	57	63	0.8910	1.963	27
4	0.0698	0.0699	86	34	0.5592	0.6745	56	64	0.8988	2.050	26
5	0.0872	0.0875	85	35	0.5736	0.7002	55	65	0.9063	2.145	25
6	0.1045	0.1051	84	36	0.5878	0.7265	54	66	0.9135	2.246	24
7	0.1219	0.1228	83	37	0.6018	0.7536	53	67	0.9205	2.356	23
8	0.1392	0.1405	82	38	0.6157	0.7813	52	68	0.9272	2.475	22
9	0.1564	0.1584	81	39	0.6293	0.8098	51	69	0.9336	2.605	21
10	0.1736	0.1763	80	40	0.6428	0.8391	50	70	0.9397	2.747	20
11	0.1908	0.1944	79	41	0.6561	0.8693	49	71	0.9455	2.904	19
12	0.2079	0.2126	78	42	0.6691	0.9004	48	72	0.9511	2.078	18
13	0.2250	0.2309	77	43	0.6820	0.9325	47	73	0.9563	3.271	17
14	0.2419	0.2493	76	44	0.6947	0.9657	46	74	0.9613	3.487	16
15	0.2588	0.2679	75	45	0.7071	1.0000	45	75	0.9659	3.732	15
16	0.2756	0.2867	74	46	0.7193	1.0355	44	76	0.9703	4.011	14
17	0.2924	0.3057	73	47	0.7314	1.0724	43	77	0.9744	4.331	13
18	0.3090	0.3249	72	48	0.7431	1.1106	42	78	0.9781	4.705	12
19	0.3256	0.3443	71	49	0.7547	1.1504	41	79	0.9816	5.145	11
20	0.3420	0.3640	70	50	0.7660	1.1918	40	80	0.9848	5.671	10
21	0.3584	0.3839	69	51	0.7771	1.2349	39	81	0.9877	6.314	9
22	0.3746	0.4040	68	52	0.7880	1.2799	38	82	0.9903	7.115	8
23	0.3907	0.4245	67	53	0.7986	1.3270	37	83	0.9925	8.144	7
24	0.4067	0.4452	66	54	0.8090	1.3764	36	84	0.9945	9.514	6
25	0.4226	0.4663	65	55	0.8192	1.4281	35	85	0.9962	11.43	5
26	0.4384	0.4877	64	56	0.8290	1.4826	34	86	0.9976	14.30	4
27	0.4540	0.5095	63	57	0.8387	1.5399	33	87	0.9986	19.08	3
28	0.4695	0.5317	62	58	0.8480	1.6003	32	88	0.9994	28.64	2
29	0.4848	0.5543	61	59	0.8572	1.6643	31	89	0.9998	57.29	1
30	0.5000	0.5774	60	60	0.8660	1.732	30	90	1.0000	∞	0
	余　弦	余　切	角度		余　弦	余　切	角度		余　弦	余　切	角度

3. 自然对数

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	$-\infty$	0.0000	0.6931	1.0986	1.3863	1.6094	1.7918	1.9459	2.0794	2.1972
1	2.3026	2.3979	2.4849	2.5649	2.6391	2.7081	2.7726	2.8332	2.8904	2.9444
2	2.9957	3.0445	3.0910	3.1355	3.1781	3.2189	3.2581	3.2958	3.3322	3.3673
3	3.4012	3.4340	3.4657	3.4965	3.5264	3.5553	3.5835	3.6109	3.6376	3.6636
4	3.6889	3.7136	3.7377	3.7612	3.7842	3.8067	3.8286	3.8501	3.8712	3.8918
5	3.9120	3.9318	3.9512	3.9703	3.9890	4.0073	4.0254	4.0431	4.0604	4.0775
6	4.0943	4.1109	4.1271	4.1431	4.1589	4.1744	4.1897	4.2047	4.2195	4.2341
7	4.2485	4.2627	4.2767	4.2905	4.3041	4.3175	4.3307	4.3438	4.3567	4.3694
8	4.3820	4.3944	4.4067	4.4188	4.4308	4.4427	4.4543	4.4659	4.4773	4.4886
9	4.4998	4.5109	4.5218	4.5326	4.5433	4.5539	4.5643	4.5747	4.5850	4.5951
10	4.6052	4.6151	4.6250	4.6347	4.6444	4.6540	4.6634	4.6728	4.6821	4.6913
11	4.7005	4.7095	4.7185	4.7274	4.7362	4.7449	4.7536	4.7622	4.7707	4.7791
12	4.7875	4.7958	4.8040	4.8122	4.8203	4.8283	4.8363	4.8442	4.8520	4.8598
13	4.8675	4.8752	4.8828	4.8903	4.8978	4.9053	4.9127	4.9200	4.9273	4.9345
14	4.9416	4.9488	4.9558	4.9628	4.9698	4.9767	4.9836	4.9904	4.9972	5.0039
15	5.0106	5.0173	5.0239	5.0304	5.0370	5.0434	5.0499	5.0562	5.0626	5.0689
16	5.0752	5.0814	5.0876	5.0938	5.0999	5.1059	5.1120	5.1180	5.1240	5.1299
17	5.1358	5.1417	5.1475	5.1533	5.1591	5.1648	5.1705	5.1761	5.1818	5.1874
18	5.1930	5.1985	5.2040	5.2095	5.2149	5.2204	5.2257	5.2311	5.2364	5.2417
19	5.2470	5.2523	5.2575	5.2627	5.2679	5.2730	5.2781	5.2832	5.2883	5.2933
20	5.2983	5.3033	5.3083	5.3132	5.3181	5.3230	5.3279	5.3327	5.3375	5.3423
21	5.3471	5.3519	5.3566	5.3613	5.3660	5.3706	5.3753	5.3799	5.3845	5.3891
22	5.3936	5.3982	5.4027	5.4072	5.4116	5.4161	5.4205	5.4250	5.4293	5.4337
23	5.4381	5.4424	5.4467	5.4510	5.4553	5.4596	5.4638	5.4681	5.4723	5.4765
24	5.4806	5.4848	5.4889	5.4931	5.4972	5.5013	5.5053	5.5094	5.5134	5.5175
25	5.5215	5.5255	5.5294	5.5334	5.5373	5.5413	5.5452	5.5491	5.5530	5.5568
26	5.5607	5.5645	5.5683	5.5722	5.5759	5.5797	5.5835	5.5872	5.5910	5.5947
27	5.5984	5.6021	5.6058	5.6095	5.6131	5.6168	5.6204	5.6240	5.6276	5.6312
28	5.6348	5.6384	5.6419	5.6454	5.6490	5.6525	5.6560	5.6595	5.6630	5.6664
29	5.6699	5.6733	5.6768	5.6802	5.6836	5.6870	5.6904	5.6937	5.6971	5.7004
30	5.7038	5.7071	5.7104	5.7137	5.7170	5.7203	5.7236	5.7268	5.7301	5.7333
31	5.7366	5.7398	5.7430	5.7462	5.7494	5.7526	5.7557	5.7589	5.7621	5.7652
32	5.7683	5.7714	5.7746	5.7777	5.7807	5.7838	5.7869	5.7900	5.7930	5.7961
33	5.7991	5.8021	5.8051	5.8081	5.8111	5.8141	5.8171	5.8201	5.8230	5.8260
34	5.8289	5.8319	5.8348	5.8377	5.8406	5.8435	5.8464	5.8493	5.8522	5.8551
35	5.8579	5.8608	5.8636	5.8665	5.8693	5.8721	5.8749	5.8777	5.8805	5.8833
36	5.8861	5.8889	5.8916	5.8944	5.8972	5.8999	5.9026	5.9054	5.9081	5.9108
37	5.9135	5.9162	5.9189	5.9216	5.9243	5.9269	5.9296	5.9322	5.9349	5.9375
38	5.9402	5.9428	5.9454	5.9480	5.9506	5.9532	5.9558	5.9584	5.9610	5.9636
39	5.9661	5.9687	5.9713	5.9738	5.9764	5.9789	5.9814	5.9839	5.9865	5.9890

续上表

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	5.9915	5.9940	5.9965	5.9989	6.0014	6.0039	6.0064	6.0088	6.0113	6.0137
41	6.0162	6.0186	6.0210	6.0234	6.0259	6.0283	6.0307	6.0331	6.0355	6.0379
42	6.0403	6.0426	6.0450	6.0474	6.0497	6.0521	6.0544	6.0568	6.0591	6.0615
43	6.0638	6.0661	6.0684	6.0707	6.0730	6.0753	6.0776	6.0799	6.0822	6.0845
44	6.0868	6.0890	6.0913	6.0936	6.0958	6.0981	6.1003	6.1026	6.1048	6.1070
45	6.1092	6.1115	6.1137	6.1159	6.1181	6.1203	6.1225	6.1247	6.1269	6.1291
46	6.1312	6.1334	C.1356	6.1377	6.1399	6.1420	6.1442	6.1463	6.1485	6.1506
47	6.1527	6.1549	6.1570	6.1591	6.1612	6.1633	6.1654	6.1675	6.1696	6.1717
48	6.1738	6.1759	6.1779	6.1800	6.1821	6.1841	6.1862	6.1883	6.1903	6.1924
49	6.1944	6.1964	6.1985	6.2005	6.2025	6.2046	6.2066	6.2086	6.2106	6.2126

$\ln 10=2.30258509$, $\ln 10^2=4.6052$, $\ln 10^3=6.9078$, $\ln 10^4=9.2103$, $\ln 10^5=11.5129$, $\ln 10^6=13.8155$。

例：$\ln 43500=\ln 435+\ln 10^2=6.0753+4.6052=10.6805$。

$\ln 0.435=\ln 435-\ln 10^3=6.0753-6.9078=-0.8325$。

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	6.2146	6.2166	6.2186	6.2206	6.2226	6.2246	6.2265	6,2285	6.2305	6.2324
51	6.2344	6.2364	6.2383	6.2403	6.2422	6.2442	6.2461	6.2480	6.2500	6.2519
52	6.2538	6.2558	0.2577	6.2596	6.2615	6.2634	6.2653	6.2672	6.2691	6.2710
53	6.2729	6.2748	6.2766	6.2785	6.2804	6.2823	6.2841	6.2860	6.2879	6.2897
54	6.2916	6.2934	6.2953	6.2971	6.2989	6.3008	6.3026	6.3044	6.3063	6.3081
55	6.3099	6.3117	6.3135	6.3154	6.3172	6.3190	6.3208	6.3226	6.3244	6.3261
56	6.3279	6.3297	6.3315	6.3333	6.3351	6.3368	6.3386	6.3404	6.3421	6.3439
57	6.3456	6.3474	6.3491	6.3509	6.3526	6.3544	6.3561	6.3578	6.3596	6.3613
58	6.3630	6.3648	6.3665	6.3682	6.3699	6.3716	6.3733	6.3750	6.3767	6.3784
59	6.3801	6.3818	6.3835	6.3852	6.3869	6.3886	6.3902	6.3919	6.3936	6.3953
60	6.3969	6.3986	6.4003	6.4019	6.4036	6.4052	6.4069	6.4085	6.4102	6.4118
61	6.4135	6.4151	6.4167	6.4184	6.4200	6.4216	6.4232	6.4249	6.4265	6.4281
62	6.4297	6.4313	6.4329	6.4345	6.4362	6.4378	6.4394	6.4409	6.4425	6.4441
63	6.4457	6.4473	6.4489	6.4505	6.4520	6.4536	6.4552	6.4568	6.4583	6.4599
64	6.4615	6.4630	6.4646	6.4661	6.4677	6.4693	6.4708	6.4723	6.4739	6.4754
65	6.4770	6.4785	6.4800	6.4816	6.4831	6.4846	6.4862	6.4877	6.4892	6.4907
66	6.4922	6.4938	6.4953	6.4968	6.4983	6.4998	6.5013	6.5028	6.5043	6.5058
67	6.5073	6.5088	6.5103	6.5117	6.5132	6.5147	6.5162	6.5177	6.5191	6.5206
68	6.5221	6.5236	6.5250	6.5265	6.5280	6.5294	6.5309	6.5323	6.5338	6.5352
69	6.5367	6.5381	6.5396	6.5410	6.5425	6.5439	6.5453	6.5468	6.5482	6.5497
70	6.5511	6.5525	6.5539	6.5554	6.5568	6.5582	6.5596	6.5610	6.5624	6.5639
71	6.5653	6.5667	6.5681	6.5695	6.5709	6.5723	6.5737	6.5751	6.5765	6.5779
72	6.5793	6.5806	6.5820	6.5834	6.5848	6.5862	6.5876	6.5889	6.5903	6.5917
73	6.5930	6.5944	6.5958	6.5971	6.5985	6.5999	6.6012	6.6026	6.6039	6.6053
74	6.6067	6.6080	6.6093	6.6107	6.6120	6.6134	6.6147	6.6161	6.6174	6.6187
75	6.6201	6.6214	6.6227	6.6241	6.6254	6.6267	6.6280	6.6294	6.6307	6.6320
76	6.6333	6.6346	6.6359	6.6373	6.6386	6.6399	6.6412	6.6425	6.6438	6.6451
77	6.6464	6.6477	6.6490	6.6503	6.6516	6.6529	6.6542	6.6554	6.6567	6.6580
78	6.6593	6.6606	6.6619	6.6631	6.6644	6.6657	6.6670	6.6682	6.6695	6.6708
79	6.6720	6.6733	6.6746	6.6758	6.6771	6.6783	6.6796	6.6809	6.6821	6.6834

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	6.6846	6.6859	6.6871	6.6884	6.6896	6.6908	6.6921	6.6933	6.6946	6.6958
81	6.6970	6.6983	6.6995	6.7007	6.7020	6.7032	6.7044	6.7056	6.7069	6.7081
82	6.7093	6.7105	6.7117	6.7130	6.7142	6.7154	6.7166	6.7178	6.7190	6.7202
83	6.7214	6.7226	6.7238	6.7250	6.7262	6.7274	6.7286	6.7298	6.7310	6.7322
84	6.7334	6.7346	6.7358	6.7370	6.7382	6.7393	6.7405	6.7417	6.7429	6.7441
85	6.7452	6.7464	6.7476	6.7488	6.7499	6.7511	6.7523	6.7534	6.7546	6.7558
86	6.7569	6.7581	6.7593	6.7604	6.7616	6.7627	6.7639	6.7650	6.7662	6.7673
87	6.7685	6.7696	6.7708	6.7719	6.7731	6.7742	6.7754	6.7765	6.7776	6.7788
88	6.7799	6.7811	6.7822	6.7833	6.7845	6.7856	6.7867	6.7878	6.7890	6.7901
89	6.7912	6.7923	6.7935	6.7946	6.7957	6.7968	6.7979	6.7991	6.8002	6.8013
90	6.8024	6.8035	6.8046	6.8057	6.8068	6.8079	6.8090	6.8101	6.8112	6.8123
91	6.8134	6.8145	6.8156	6.8167	6.8178	6.8189	6.8200	6.8211	6.8222	6.8233
92	6.8244	6.8255	6.8265	6.8276	6.8287	6.8298	6.8309	6.8320	6.8330	6.8341
93	6.8352	6.8363	6.8373	6.8384	6.8395	6.8405	6.8416	6.8427	6.8437	6.8448
94	6.8459	6.8469	6.8480	6.8491	6.8501	6.8512	6.8522	6.8533	6.8544	6.8554
95	6.8565	6.8575	6.8586	6.8596	6.8607	6.8617	6.8628	6.8638	6.8648	6.8659
96	6.8669	6.8680	6.8690	6.8701	6.8711	6.8721	6.8732	6.8742	6.8752	6.8763
97	6.8773	6.8783	6.8794	6.8804	6.8814	6.8824	6.8835	6.8845	6.8855	6.8865
98	6.8876	6.8886	6.8896	6.8906	6.8916	6.8926	6.8937	6.8947	6.8957	6.8967
99	6.8977	6.8987	6.8997	6.9007	6.9017	6.9027	6.9037	6.9048	6.9058	6.9068

$\ln 10=2.30258509$，$\ln 10^2=4.6052$，$\ln 10^3=6.9078$，$\ln 10^4=9.2103$，$\ln 10^5=11.5129$，$\ln 10^6=13.8155$。

例：$\ln 7620=\ln 762+\ln 10=6.6359+2.3026=8.9385$。

$\ln 0.0762=\ln 762-\ln 10^4=6.6359-9.2103=-2.5744$。

4. 指数函数和双曲函数

双曲正弦：$\mathrm{sh}x=\dfrac{e^x-e^{-x}}{2}$.

双曲余弦：$\mathrm{ch}x=\dfrac{e^x+e^{-x}}{2}$.

双曲正切：$\mathrm{th}x=\dfrac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}}$.

x	e^x	e^{-x}	$\mathrm{sh}x$	$\mathrm{ch}x$	$\mathrm{th}x$	x	e^x	e^{-x}	$\mathrm{sh}x$	$\mathrm{ch}x$	$\mathrm{th}x$
0	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000	3	20.09	0.0498	10.02	10.07	
0.1	1.105	0.905	0.100	1.005	0.100	3.1	22.20	0.0450	11.08	11.12	
0.2	1.221	0.819	0.201	1.020	0.197	3.2	24.53	0.0408	12.25	12.29	
0.3	1.350	0.741	0.305	1.045	0.291	3.3	27.11	0.0369	13.54	13.57	
0.4	1.492	0.670	0.411	1.081	0.380	3.4	29.96	0.0334	14.97	15.00	
0.5	1.649	0.607	0.521	1.128	0.462	3.5	33.12	0.0302	16.54	16.57	当$x>3$时，$\mathrm{th}x$与1相差很小。
0.6	1.822	0.549	0.637	1.185	0.537	3.6	36.60	0.0273	18.22	18.31	
0.7	2.014	0.497	0.759	1.255	0.604	3.7	40.45	0.0247	20.21	20.24	
0.8	2.226	0.449	0.888	1.337	0.664	3.8	44.70	0.0224	22.34	22.36	
0.9	2.460	0.407	1.027	1.433	0.716	3.9	49.40	0.0202	24.69	24.71	

续上表

x	e^x	e^{-x}	sh$x$	ch$x$	th$x$	x	e^x	e^{-x}	sh$x$	ch$x$	th$x$
1	2.718	0.368	1.175	1.543	0.762	4	54.60	0.0183	27.29	27.31	
1.1	3.004	0.333	1.336	1.669	0.800	4.1	60.34	0.0166	30.16	30.18	
1.2	3.320	0.301	1.509	1.811	0.834	4.2	66.69	0.0150	33.34	33.35	
1.3	3.669	0.273	1.698	1.971	0.862	4.3	73.70	0.0136	36.84	36.86	
1.4	4.055	0.247	1.904	2.151	0.885	4.4	81.45	0.0123	40.72	40.73	
1.5	4.482	0.223	2.129	2.352	0.905	4.5	90.02	0.0111	45.00	45.01	
1.6	4.953	0.202	2.376	2.577	0.922	4.6	99.48	0.0101	49.74	49.75	
1.7	5.474	0.183	2.646	2.828	0.935	4.7	109.9	0.0091	54.97	54.98	
1.8	6.050	0.165	2.942	3.107	0.947	4.8	121.5	0.0082	60.75	60.76	
1.9	6.686	0.150	3.268	3.418	0.956	4.9	134.3	0.0074	67.14	67.15	当$x>3$时，th$x$与1相差很小。
2	7.389	0.135	3.627	3.762	0.964	5	148.4	0.0067	74.20	74.21	
2.1	8.166	0.122	4.022	4.144	0.970	5.1	164.0	0.0061	82.01	82.01	
2.2	9.025	0.111	4.457	4.568	0.976	5.2	181.3	0.0055	90.63	90.64	
2.3	9.974	0.100	4.937	5.037	0.980	5.3	200.3	0.0050	100.2	100.2	
2.4	11.02	0.0907	5.466	5.557	0.984	5.4	221.4	0.0045	110.7	110.7	
2.5	12.18	0.0821	6.050	6.132	0.987	5.5	244.7	0.0041	122.3	122.3	
2.6	13.46	0.0743	6.695	6.769	0.989	5.6	270.4	0.0037	135.2	135.2	
2.7	14.88	0.0672	7.406	7.473	0.991	5.7	298.9	0.0033	149.4	149.4	
2.8	16.44	0.0608	8.192	8.253	0.993	5.8	330.3	0.0030	165.1	165.2	
2.9	18.17	0.0550	9.060	9.115	0.994	5.9	365.0	0.0027	182.5	182.5	
3	20.09	0.0498	10.02	10.07	0.995	6	403.4	0.0025	201.7	201.7	

第 2 卷

燃料、润滑油、涂料及水

主　　编　钱耀南
副 主 编　周永端
主　　审　邵祖德　徐以介
执　　笔　马家俊　鲍毓俊　周永端　钱耀南　梁莲静
审　　稿　邵祖德　杨剑挥　徐以介　盛知恒
特约编辑　周国雄
责任编辑　蒋明耀

第1篇　石油的基本知识

第1章　石油的化学组成及其性质

石油主要是由碳和氢两种元素化合而成的，由各种烃类所组成。烃类按其结构的不同分为烷烃、环烷烃、芳香烃和不饱和烃（烯烃）等四种。不同烃类对各种石油产品性质的影响不同，在使用和保管各种石油产品时应予以注意。

1　烷烃

烷烃是组成石蜡基原油的主要成分。烷烃的分子一般是由一系列碳氢原子构成的饱和碳氢化合物，即在烷烃分子中每个碳原子都有足够数量的氢原子和它化合。烷烃中的碳原子排成直链结构，这类烷烃称为正构烷烃；有的烷烃其碳原子排列呈侧链结构，称之为异构烷烃。由于烷烃类碳氢化合物的分子中含碳原子的数量不同，就形成了不同的石油产品。在常温、常压下，烷烃分子中含有1到4个碳原子的低分子烷烃类为气体状态；含5到16个碳原子的烷烃类为液体状态，如汽油、煤油、柴油及轻质润滑油；含17个以上碳原子的烷烃类则为固体状态，它是石蜡、地蜡的主要成分。一般烷烃的密度、沸点和熔点都随分子量的增加而提高，而烷烃分子的侧链结构一般都使沸点降低。

烷烃的性质较安定，不易氧化。如果汽油中含异构烷烃多，则抗爆性好；含正构烷烃多，则抗爆性较差。如果柴油中含正构烷烃多，则燃烧性能良好，发动机工作平稳。润滑油中含烷烃较多时，其粘温性能良好。但柴油和润滑油中如含正构烷烃过多时，则凝点升高，低温流动性能变差。

2　环烷烃

环烷烃是分子中的碳原子呈环状排列，并有足够数量的氢原子与之化合的饱和烃。存在于石油中的环烷烃主要为环戊烷和环己烷等。

在常温下，碳原子数在4个以下的环烷烃为气体，4个以上的为液体。环烷烃的化学性质与烷烃相近。用环烷芳香基原油可以生产高辛烷值的直馏汽油，其抗爆性比正构烷烃好。含硫低的石蜡环烷基原油，不但便于加工，而且是生产高级润滑油的良好原料。含有较多的多环长侧链的环烷化合物的石油，则是优质润滑油的理想原料。

3　芳香烃

芳香烃的分子结构呈环状，而且其中氢原子的数量比其碳原子所能化合的数量少，是一

种不饱和的环状碳氢化合物。在常温下芳香烃有非常高的稳定性，如苯是最难氧化的物质之一。在苯环上加上一个或几个侧链后，芳香烃的自动氧化能力加强，侧链越长则越易氧化，易生成酸性物质及胶状物。

汽油中所含的芳香烃主要是苯、甲苯、二甲苯等。

芳香烃的抗爆性好，是汽油的优良成分。灯用煤油必须含有适量（20%以下）的芳香烃，才能保证照明强度。芳香烃能使柴油的燃烧性能变坏，因此是柴油中的不良成分。在润滑油中含多环芳香烃和带短侧链的环烷-芳香烃是不利的，它们能使粘温特性及氧化安定性变坏，但双环芳香烃则具有良好的热安定性和浮游性。

4 不饱和烃

当烃类碳氢化合物中的碳与碳原子间的结合不是单价时，则称不饱和烃。烯烃和炔烃都属不饱和烃。前者的碳与碳原子间为两价结合，后者则为三价结合，因而炔烃比烯烃的不饱和度更大。不饱和烃在原油中含量极少，它主要是在炼制过程中产生的。当石油分馏或经高温裂化时，有一些烷烃会分解成为烯烃和炔烃。由于它们的化学不稳定性，很容易被氧化而叠合生成胶质，因此，在炼制某些石油产品（如煤油、柴油、润滑油）时，应将不稳定烯烃除去。不饱和烃在汽油中虽能提高其抗爆性，但有一部分不饱和烃的安定性极差，不宜长期贮存，也应除去。

5 原油的分类和性质

5.1 原油的分类

5.1.1 按特性因数分类

原油的特性因数K可按下式计算：

$$K=\frac{1.216\sqrt[3]{T}}{\alpha}$$

式中：T——原油平均沸点的绝对温度，K；

α——原油在15.6℃时的密度，g/cm³。

根据特性因数，可将原油分为三类：

1）石蜡基原油　原油的特性因数$K>12.1$。这类原油的特点含有较多的石蜡，凝点高。我国大庆的原油属于此类。

2）中间基原油　原油的特性因数$K=11.5\sim12.1$。这类原油含有一定数量的烷烃、环烷烃和芳香烃。我国胜利和大港的原油属于此类。

3）环烷基原油　原油的特性因数$K=10.5\sim11.5$。这类原油的特点是含有较多环烷烃，凝点较低。我国克拉玛依的原油属于此类。

特性因数分类法应用较久，比较简单，但不够确切。

5.1.2 按关键馏分特性分类

用特定的仪器，将原油在常压和减压下蒸馏出两个馏分：馏程为250～275℃的称为第一关键馏分；馏程为395～425℃的称为第二关键馏分。测定两个关键馏分的相对密度和相对密度指数（比重指数），然后对照规定的表，可将原油分为七类，即：石蜡基、石蜡—中间基、

中间—石蜡基、中间基、中间—环烷基、环烷—中间基、环烷基。关键馏分特性分类法是一种较新的分类法，它可以较确切地说明原油的特性。

5.1.3 按含硫量分类

按含硫量的多少，原油可分为：

（1）低含硫原油　含硫量低于0.5%的原油；

（2）含硫原油　含硫量为0.5%～2%的原油；

（3）高含硫原油　含硫量高于2%的原油。

5.2 原油的性质

原油中所含的各种烃类的多少以及硫分、残炭的高低等，对石油制品的质量及炼制过程均有较大的影响。如有些原油含烷烃多、芳香烃少，属高凝、低残炭、高含蜡原油，适于制造优质的柴油机燃料和润滑油；有些原油为低硫的中间基原油，汽油馏分含环烷烃较多，为重整制芳香烃的良好原料；有些含蜡少、硫分低的原油，可制成各种燃料和氧化安定性好的润滑油；有些中间基原油，含异构烷烃及环烷烃较多，含蜡、含硫都很少，轻质成分较多，可炼制出低凝点的润滑油，如冷冻机油等。

表2.1.1-1所示为我国几种原油的性质。

表2.1.1-1　**我国几种原油的性质**

	大　庆	玉　门	新　疆	胜　利
相对密度20℃	0.8604	0.8698	0.8679	0.8886
粘度50℃　(mm^2/s)	23.79	15.9	19.23	29.38
闪点(℃)(开口法)	38	—	36	19
(℃)(闭口法)	—	—	—18	—
凝点(℃)	23	8	--50	30
含蜡量(%)(蒸馏法)	17.9	8.3	2.04	—
(吸附法)	28.7	—	—	17.1
蜡熔点(℃)(蒸馏法)	51～52.4	47.5	50	—
(吸附法)	49～51	—	—	52～54
胶质(%)(硫酸法)	—	48	44	59
(硅胶法)	15.9	12.3	12.6	19
沥青质(%)	—	1.4	0.01	—
残　炭(%)	3.1	5.1	3.7	4.9
酸值(mgKOH/g)	—	0.4	0.78	0.22
含盐量(mgNaCl/l)	133	1480	9	3057
水　分(%)	6.6	6.5	—	2.0
灰　分(%)	2.02	—	0.005	—
机械杂质(%)	无	—	—	0.15
含硫量(%)	0.11	0.11	0.04	0.64
蒸馏试验：				
初馏点(℃)	79	79	58	82
馏出量(%)				
100℃	1	—	—	—
120℃	3	4	5	2.5
140℃	5	7	8	5.0
160℃	8	12	12	7.5
180℃	10	14	15	10

续上表

	大　庆	玉　门	新　疆	胜　利
200℃	12	17	18	12.5
220℃	15	19	22	15
240℃	16	23	24	17.5
260℃	18	25	27.5	20
280℃	21	29	31	23
300℃	25	34	35	26
分子量	—	280	299	—
特性因数，K值	12.6	12.3	—	12.05

第 2 章　石油炼制的基本方法及其产品性质

1　常压蒸馏（直馏）

常压蒸馏是根据原油中各类烃分子沸点的不同，在常压下利用加热蒸发、冷凝等步骤直接分馏制得汽油（35～200℃的馏分）、煤油（175～300℃的馏分）、柴油（200～550℃的馏分）及重油（馏分在350℃以上）等。这些石油产品称为直馏产品，其中重油也可作为润滑油原料和裂化原料。

直馏产品主要是由烷烃和环烷烃以及少量芳香烃所组成，一般不含不饱和烃。因此，直馏产品比裂化产品性质安定，不易氧化变质，经过适当精制，宜于长期贮存。

2　减压蒸馏

减压蒸馏是利用蒸馏时减低压力而使重油沸点降低的原理，将常压蒸馏得到的重油进行再分馏，从而制得各种润滑油馏分和裂化原料与制蜡原料的方法。但用此法制得的润滑油还含有一些不良成分，需要再进行精制。

3　热裂化

热裂化法的原理是在高温加压的条件下，使大分子烃受热分解裂化为小分子烃。热裂化产品主要是汽油。

这种方法的优点是提高了汽油的生产率，产品的抗爆性也比直馏汽油好。但由于热裂化产品中含有不饱和烃，所以性质不安定，贮存时易氧化变质。

4　催化裂化

催化裂化是在催化剂的作用下，使烃分子受热裂化。由于催化剂的作用，除大分子烃变成小分子烃外，并能改变其分子结构，使不饱和的烯烃含量大大减少（热裂化法石油产品中烯烃含量约为30%，而催化裂化法则约为9%），异构烷烃和芳香烃增加。催化裂化汽油性质安定，燃烧性也好。

5　加氢裂化

加氢裂化可以将各种轻重不同的原料（从直馏柴油到减压渣油），在高温、高压下加氢和催化剂，进行裂化加氢和异构化，从而获得各种高质量的油品，如高辛烷值汽油、低凝点航空煤油、低凝点柴油、粘温性能良好的润滑油等。同时，这种方法的产品产量很高，可接近100%，是一种较新的方法。但此法所用设备复杂、投资大，操作条件也较严格。

6　精制

精制是进一步将石油产品中所含的不良成分（如硫、氧化物及胶状物等）除去的一个工艺过程。精制的主要方法有酸碱精制、硫酸白土处理、溶剂精制、加氢精制、脱蜡等。

6.1 酸碱精制

先用浓硫酸与油中的不良成分发生作用，使之生成酸渣沉淀。除去酸渣后，再用碱中和剩余的酸，最后得到安定性好的石油产品。

6.2 硫酸白土处理

先用浓硫酸与油中的不良成分发生作用，使之生成酸渣沉淀。除去酸渣后，再用白土吸附剩余的酸性物质及其它不良成分，进一步提高石油产品的安定性并改善其颜色。

6.3 溶剂精制

利用加入一些特殊的溶剂除去油中的不良成分的方法。常用的溶剂有糠醛、酚等。它们既能与油中的不良成分发生作用，又能与好油分离。丙烷则具有与油互溶而与沥青互不溶解的特点，因此可用以脱除渣油中的沥青，然后进行酚精制。

6.4 加氢精制

在一定的温度和压力下，利用加氢使油中的不饱和烃变为饱和烃，从而除去油中的不良成分。这是一种较好的精制方法，它可以简化精制工序，提高石油产品的安定性和产量。

6.5 脱蜡

蜡的主要成分是较大分子的正构烷烃。脱蜡就是设法除去这些正构烷烃，以制得凝点低的石油产品。脱蜡的方法有尿素脱蜡、分子筛脱蜡、冷榨脱蜡、溶剂脱蜡、微生物脱蜡等。

1)尿素脱蜡

利用尿素与大分子正构烷作用，生成络合物后从油中分离出来，从而达到脱蜡的目的。尿素脱蜡能获得凝点很低的石油产品。

2)分子筛脱蜡

分子筛是人工合成的泡沸石。它是一种多孔的吸附剂，具有特殊的孔道结构，仅能吸附正构烷烃分子，从而达到脱蜡的目的。

3)冷榨脱蜡

通过冷冻、压榨的方法将油中的蜡分离出来，使石油产品的凝点降低。

4)溶剂脱蜡

向油中加入一些溶剂以降低油的粘度，经低温冷冻后，使油与蜡分离。常用的溶剂有丙酮、苯及甲苯的混合物等。

第 3 章　国产石油产品的分类、命名和代号

1　石油产品的分类、命名和代号

1.1　石油产品分类编组的原则

石油产品的分类是根据石油产品的用途系统或特性系统进行的。它分为溶剂油、石油燃料、润滑油、电器用油、液压油及液压液、真空油脂、防锈油脂、工艺用油、润滑脂、蜡及其制品、沥青、焦、石油添加剂和石油化学品及其他等 14 类。

石油产品的分类编组规定按以下两种形式之一进行：

1) 类别 → 组别 → 级别 → 牌号 （尾注）。

2) 类别 → 组别 → 牌号 （尾注）。

各类石油产品的编组应根据产品的主要用途（包括使用对象和使用效能）或根据组成性质进行划分。

每一组产品可以有不同的级别。其级别的划分应根据产品的使用条件或使用特点进行。按照产品的具体情况可划分为轻级、中级、重级、低温、高温、低速、高速、船用、陆用、工业、军械以及特种等级。不需要分级时可以直接编列牌号。

编列牌号的原则应根据产品的主要理化参数进行，也可依据产品的其他特性，用顺序号如 1 号、2 号、3 号等编列牌号。各种石油产品编列牌号所依据的主要理化参数见表 2.1.3-1。为了区别相同牌号而有不同性质或来源的产品，须在牌号后面附加尾注。

表 2.1.3-1　　编列产品牌号主要理化参数根据表

产品类组名称	编列牌号根据
1．石油燃料类	
（1）航空汽油组，汽油组，煤油组中拖拉机煤油	（1）辛烷值
（2）液化石油气组	（2）组成中的碳原子数
（3）喷气燃料组	（3）按先后顺序号
（4）柴油组	（4）凝点（℃）
（5）重油组	（5）80℃时运动粘度平均值（mm^2/s）
2．润滑油类	
（1）喷气机润滑油、汽轮机油、冷冻机油、机械油（部分）、仪表油及车轴油等组	（1）轻馏分润滑油按 50℃时运动粘度平均值（mm^2/s）
（2）航空润滑油，汽油机润滑油，柴油机润滑油，压缩机油，汽缸油，齿轮油，机械油中重型机械用油等组	（2）重馏分润滑油和残渣润滑油按 100℃时运动粘度平均值（mm^2/s）
（3）特种润滑油组	（3）按先后顺序号
（4）其他用途润滑油组	（4）根据各产品特点按 50℃或 100℃时运动粘度平均值（在该类产品分组标准中，另作具体规定）
3．电器用油类	
（1）变压器油组	（1）凝点（℃）
（2）电缆油组和特种电器用油组	（2）击穿电压千伏数
（3）电容器油组	（3）按用途分为 1 号及 2 号。1 号代表动力用，2 号代表电信用

续上表

产品类组名称	编列牌号根据
4．液压油及液压液类 （1）各组液压油 （2）液压液	 （1）50℃时运动粘度平均值（mm^2/s） （2）按先后顺序号
5．真空油脂类 （1）扩散泵油组 （2）真空封泥组及真空封蜡组 （3）真空泵油组及真空增压泵油组 （4）真空封脂组	 （1）极限真空度幂数 （2）按使用温度，℃ （3）按先后顺序 （4）按特定1、2、3顺序号
6．润滑脂类 各组润滑脂	 润滑脂类各组产品按针入度的系列号数划分
7．溶剂油类 （1）香花、抽提、橡胶、洗涤、及油漆溶剂油等组 （2）石油醚组 （3）工业溶剂油组	 （1）98%馏出温度（℃） （2）95%馏出温度（℃） （3）干点，℃
8．蜡及其制品类 （1）石蜡组 （2）地蜡组、石油脂组，凡士林组	 （1）熔点（℃） （2）滴点（℃）
9．焦类 焦类各组	 按特定顺序号
10．沥青类 沥青类各组	 针入度的平均数
11．其余各类	根据各类产品的主要理化参数，在各该类产品的分类、命名和代号的标准中具体规定

1.2 石油产品的命名方法

石油产品的名称通常是由组别名称、级别名称和牌号名称（有时附尾注）组成。组别名称为产品名称的主体，牌号和级别名称表示产品的主要属性。

产品名称的排列次序是牌号在名称的最前面，如必须表明合成或页岩产品时，则将合成或页岩字样加在牌号后面，但一般可以不加；级别名称放在其次；最后是产品的组别名称，如10号页岩重柴油。

1.3 石油产品代号的规定

石油产品类别和组别的符号均用汉语拼音字母的表示，一般为第一个字的汉语拼音字的第一个字母。各类石油产品的固定符号如表2.1.3-2所示。

表2.1.3-2 **各类石油产品的固定符号**

产品类别	固定符号	产品类别	固定符号
溶剂油类	N	蜡及其制品类	L
石油燃料类	R	沥青类	Q
润滑油类	H	焦类	J
电气用油类	D	真空油脂类	K
液压油及液压液类	Y	防锈油脂类	F
工艺用油类	G	石油添加剂类	T
润滑脂类	Z	石油化学品及其他类	X

石油产品的级别符号用特定的阿拉伯数字表示，如表 2.1.3-3 所示。

表 2.1.3-3　　石油产品的级别符号（GB498）

级　别	符号	级　别	符号	级　别	符号	级　别	符号	级　别	符号	级　别	符号
轻	1	白	20	直　馏	30	工　业	40	通　用	50	主　轴	61
中	2	黄	21	提　纯	31	农　业	41	灯　用	51		
重	3	软	22			铁　道	42	信　号	52		
高　速	4	粗	23			船　用	43	仪　表	53		
低　速	5					陆　用	44	皂　用	54		
高　温	6					航　空	45	拖拉机	55		
低　温	7					军　械	46	绝　缘	56		
极　压	8					医　药	47	双曲线	57		
抗　磨	9							越野车	58		
密　封	10							钟　表	59		
								导　轨	60		

石油产品的牌号用阿拉伯数字或与汉语拼音字母联合一起来表示，如“Z10”是“正 10”的符号。规定牌号不得超过三位数字。在书写代号时，应在牌号的阿拉伯数字前面加一短横。

尾注的符号也用汉语拼音字母表示，如表 2.1.3-4 表示。

表 2.1.3-4　　**尾　注　符　号**

尾　　注	符　　号
合成油产品或合成脂肪酸制品	H
页岩石油产品	Y
加有石墨填料的产品	S
加有二硫化钼的产品	E
低凝产品	D

石油产品的代号由类号、组号、级号及牌号（尾注）等组成，如 24 号合成汽缸油的代号为“HG-24 H”，20 号重柴油的产品代号为“RC 3 -20”。

2　石油燃料类的分组、命名和代号

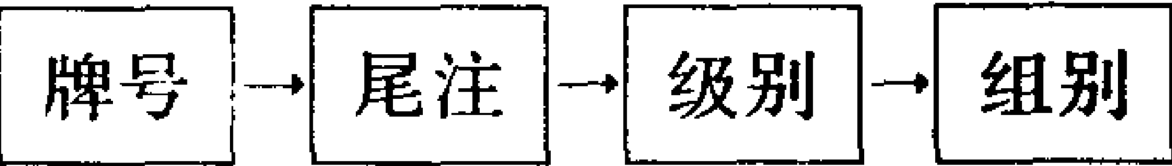
2.1　石油燃料类产品分组

石油燃料按馏分性质分为液化石油气、航空汽油、汽油、喷气燃料、煤油、柴油、重油、渣油和特种燃料等 9 组。

各组石油燃料根据使用对象或使用条件分成不同的级。煤油组分灯用级、信号灯级和拖拉机级。柴油组分轻级、重级、船用级和直馏级。为了简化级别，轻级柴油简化为柴油；重油分陆用级与船用级，陆用重油简称重油。

2.2 石油燃料类产品的命名

石油燃料的命名按GB 498 的规定进行。其命名顺序为：



特种燃料产品简称特某号燃料。

2.3 石油燃料类产品的代号

石油燃料类产品的代号由五部分组成，按顺序分别表示类别、组别、级别、牌号和尾注。

石油燃料类产品的类别符号用汉语拼音字母“R”表示。

石油燃料类产品的组别符号用汉语拼音字母表示，如表 2.1.3-5 所示。

表 2.1.3-5 石油燃料类产品的组别符号

组别	汉语拼音	符号
液化石油气	YEHUA SHIYOU QI	Y
航空汽油	HANGKONG QIYOU	H
汽油	QIYOU	Q
喷气燃料	PENQI RANLIAO	P
煤油	MEIYOU	M
柴油	CHAIYOU	C
重油	ZHONGYOU	Z
渣油	ZHAYOU	A
特种燃料	TEZHONG RANLIAO	T

石油燃料的级别符号按GB 498 的统一规定，用阿拉伯数字表示（参阅表 2.1.3-3）。

石油燃料的牌号根据其理化参数用阿拉伯数字表示。为了与级别符号的阿拉伯数字相区别，在牌号前加一短横。如正 10 号柴油的代号为“RC-Z 10”，10 号船用柴油的代号为“RC 43-10”，渣油的代号则为“RA”等。

表 2.1.3-6 为石油燃料类的分组、命名和代号举例。

表 2.1.3-6 石油燃料类的分组、命名和代号举例

组别	级别	命名	代号
液化石油气		工业丙烷 工业丁烷 丙烷-丁烷混合气	RY-3 RY-4 RY-3/4
航空汽油		95/130 号航空汽油 91/115 号航空汽油 70 号航空汽油	RH-95 RH-91 RH-70
汽油		80 号汽油 76 号汽油 74 号汽油 70 号汽油 66 号汽油	RQ-80 RQ-76 RQ-74 RQ-70 RQ-66
喷气燃料		1 号喷气燃料	RP-1

续上表

组　　别	级　　别	命　　名	代　　号
煤　　油	灯　　用	灯用煤油	RM 51
	信 号 灯	信号灯煤油	RM 52
	拖 拉 机	拖拉机煤油	RM 55
柴　　油	轻	35 号柴油 20 号柴油 10 号柴油 0 号柴油 正 10 号柴油 0 号页岩柴油	RC-35 RC-20 RC-10 RC- 0 RC-Z 10 RC- 0 Y
柴　　油	船　　用	10 号船用柴油	RC 43-10
	直　　馏	10 号直馏柴油	RC 30-10
	重	10 号重柴油 20 号重柴油	RC3-10 RC 3-20
重　　油	船　　用	12 号船用重油 20 号船用重油	RZ 43-12 RZ 43-20
	陆　　用	60 号重油 100 号重油 200 号重油	RZ-60 RZ-100 RZ-200
渣　　油		渣油	RA
特　　种		特 1 号燃料	RT- 1

3　润滑油的分组、命名和代号

3.1　润滑油产品的分组

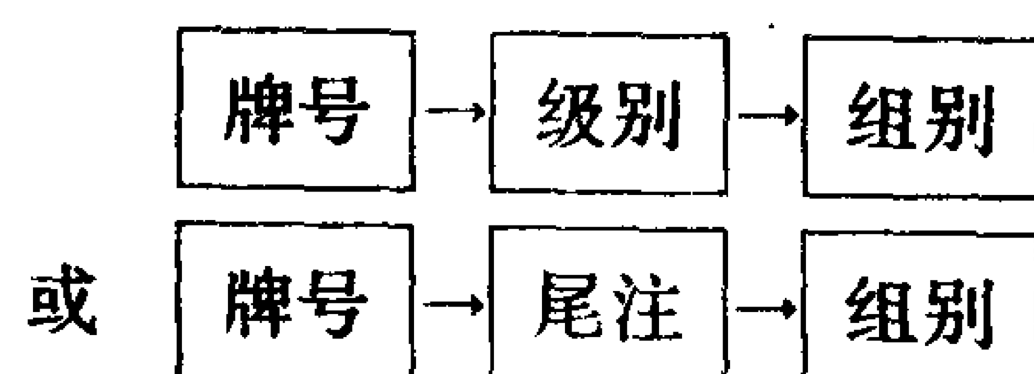
润滑油按所润滑的机器种类和结构部件的特点分为：喷气机润滑油、航空润滑油、汽油机润滑油、柴油机润滑油、压缩机油、冷冻机油、汽缸油、机械油、仪表油、车轴油、齿轮油、特种润滑油、精密机床用油、其它用途润滑油等 15 组。

润滑油按机械使用条件的优劣程度，分为轻级、中级和重级，高速和低速，高温和低温等不同级别；也可按使用机器的种类和结构部件的特点来划分级别，如极压、双曲线、越野车等。

润滑油产品的牌号一般按运动粘度的平均值（mm^2/s）来划分（详见表 2.1.3-3）。合成润滑油和低凝润滑油除按运动粘度区分外，还须标明“合成”、“低凝”等分别以尾注“H”和“D”表示，以示区别。特种润滑油产品牌号，用顺序号表示。

3.2　润滑油产品的命名

润滑油产品的命名，按GB 498 的规定进行。命名顺序为：



3.3 润滑油产品的代号

润滑油产品代号由4部分组成，按顺序分别表示类别、组别、级别和牌号。

润滑油产品的类别符号用汉语拼音字母“H”表示。

润滑油组别符号用汉语拼音字母表示，如表2.1.3-7所示。

表2.1.3-7　润滑油组别符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
喷气机润滑油	P	汽轮机油	U	车轴油	Z
航空润滑油	H	冷冻机油	D	齿轮油	L
汽油机润滑油	Q	汽缸油	G	特种润滑油	T
柴油机润滑油	C	机械油	J	精密机床用油	M
压缩机油	S	仪表油	Y	其他用途润滑油	A

润滑油级别符号按GB 498的规定用阿拉伯数字表示（参阅表2.1.3-3）。

表2.1.3-8为润滑油的分组、命名和代号举例。

表2.1.3-8　润滑油的分组、命名和代号示例

分组	分级	命名	代号
喷气机润滑油 (P)		8号喷气机润滑油 8号合成喷气机润滑油	HP-8 HP-8H
航空润滑油 (H)		14号航空润滑油 20号航空润滑油 14号合成航空润滑油	HH-14 HH-20 HH-14H
汽油机润滑油 (Q)	汽油机润滑油	6号汽油机润滑油 6号低凝汽油机润滑油 10号汽油机润滑油 15号汽油机润滑油	HQ-6 HQ-6D HQ-10 HQ-15
	重级汽油机润滑油 (3)		
柴油机润滑油 (C)	柴油机润滑油	8号柴油机润滑油 11号柴油机润滑油 14号柴油机润滑油	HC-8 HC-11 HC-14
	中级柴油机润滑油 (2)	16号柴油机润滑油 20号柴油机润滑油	HC2-16 HC2-20
	重级柴油机润滑油 (3)		
压缩机油 (S)		13号压缩机油 19号压缩机油	HS-13 HS-19
汽轮机油 (U)	汽轮机油	22号汽轮机油 30号汽轮机油 46号汽轮机轴 57号汽轮机油	HU-22 HU-30 HU-46 HU-57
	极压汽轮机油 (8)		

续上表

分组	分级	命名	代号
冷冻机油 (D)		13号冷冻机油 18号冷冻机油 25号冷冻机油	HD-13 HD-18 HD-25
汽缸油 (G)		11号汽缸油 24号汽缸油 38号汽缸油 52号汽缸油 62号汽缸油 24号合成汽缸油 33号合成汽缸油 65号合成汽缸油 72号合成汽缸油	HG-11 HG-24 HG-38 HG-52 HG-62 HG-24 H HG-33 H HG-65 H HG-72 H
机械油 (J)	高速机械油	3号机械油 5号机械油	HJ-3 HJ-5
	机械油	7号机械油 10号机械油 12号低凝机械油	HJ-7 HJ-10 HJ-120
机械油 (J)	机械油	20号机械油 30号机械油 40号机械油 50号机械油 70号机械油 90号机械油	HJ-20 HJ-30 HJ-40 HJ-50 HJ-70 HJ-90
	重型机械用油 (3)	压榨机油 28号轧钢机油	HJ 3-10 HI 3-28
仪表油 (Y)	仪表油	8号仪表油 8号合成仪表油	HY-8 HY-8 H
	钟表油 (59)		
车轴油 (Z)		13号低凝车轴油 23号车轴油 32号通用车轴油 44号车轴油	HZ-13 D HZ-33 HZ-32 HZ-44
齿轮油 (L)	齿轮油	20号齿轮油 30号齿轮油	HL-20 HL-30
	双曲线齿轮油 (57)	22号双曲线齿轮油 28号双曲线齿轮油	HL 57-22 HL 57-28
	越野车齿轮油 (58)	10号越野车齿轮油 15号越野车齿轮油	HL 58-10 HL 58-15

4 润滑脂的分组、命名和代号

4.1 润滑脂的分组

润滑脂按其所含稠化剂的组成分为皂基脂、烃基脂、无基脂和有基脂四大组。皂基脂按所含皂类的不同又分为单一皂基脂、混合皂基脂及复合皂基脂等若干小组。各组符号如表

2.1.3-9所示。

同组的各种润滑脂按用途或使用条件分为密封工业、铁道、船用、航空、军械、仪表或高温、低温等若干级。各级符号按GB 498 的规定用阿拉伯数字表示（参阅表 2.1.3-3）。

表 2.1.3-9　**润滑脂的分组及符号**

组别名称			组号		
			汉字	汉语拼音	符号
皂基	单一皂基	钙基	钙	Gai	G
		钠基	钠	Na	N
		锂基	锂	Li	L
		铝基	铝	Lu	U
		钡基	钡	Bei	B
		铅基	铅	Qian	Q
		其他基	他	Ta	A
皂基	混合皂基	钙-钠基	钙 钠	Gai Na	GN
		钙-铝基	钙 铝	Gai Lu	GU
		铅-钡基	铅 钡	Qian Bei	QB
		铝-钡基	铝 钡	Lu Bei	UB
	复合皂基	复合钙基	复 钙	Fu Gai	FG
		复合铝基	复 铝	Fu Lu	FU
烃基			基	Ji	J
无机			无	Wu	W
有机			有	You	Y

同组、同级的各种润滑脂按其针入度范围（25℃），用接近的系列号（牌号）区分之。针入度系列号如表 2.1.3-10 所示。

表 2.1.3-10　**针入度系列号**

系列号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
针入度值	355/385	310/340	265/295	220/250	175/205	130/160	85/115	60/80	35/55	10/30

同组、同级、同牌号的各种润滑脂则按其特殊属性用尾注来区分。尾注的符号及其意义如表 2.1.3-11 所示。

表 2.1.3-11　**尾注的符号及其意义**

尾注	尾注号（汉语拼音）	意义
合成	H	合成脂肪酸
石墨	S	石墨
二硫化钼	E	二硫化钼

4.2　润滑脂的命名

润滑脂的命名按下列顺序表示



普通润滑脂用组别名称，即用稠化剂基名称表示。如 1 号合成钙基脂（代号为ZG-1H）。专用润滑脂用级别名称，或用所属级的具体使用部件名称表示（如工业级可按延压机或

齿轮等部件名称表示)。例如2号延压机脂(代号为ZGN 40-2)。

4.3 润滑脂的代号

润滑脂的代号由4或5部分组成,其排列顺序如下:



类号用汉语拼音字母"Z"表示。

普通润滑脂不分级,代号中无级号。如4号石墨烃基润滑脂的代号为ZJ-4S。

专用润滑脂要分级,代号中有级号。如1号船用润滑脂的代号为ZU 43-1。

特种润滑脂的代号用"ZT-顺序号"表示。如ZT-11(特11号润滑脂)。

润滑脂的分组、命名和代号举例见表2.1.3-12。

表2.1.3-12 润滑脂的分组、命名和代号举例

分组	分级	命名	代号
钙基(G)		1号钙基润滑脂 2号钙基润滑脂 3号钙基润滑脂 4号钙基润滑脂 5号钙基润滑脂 2号合成钙基润滑脂 3号合成钙基润滑脂 石墨钙基润滑脂	ZG-1 ZG-2 ZG-3 ZG-4 ZG-5 ZG-2H ZG-3H ZG-S
	工业(40)	1号齿轮润滑脂 2号齿轮润滑脂	ZG 40-1 ZG 40-2
钠基(N)		2号钠基润滑脂 3号钠基润滑脂 4号钠基润滑脂 3号合成钠基润滑脂 4号合成钠基润滑脂	ZN-2 ZN-3 ZN-4 ZN-3H ZN-4H
	高温(6)	4号高温润滑脂	ZN 6-4
	铁道(42)	9号铁道润滑脂 8号铁道润滑脂 1号制动缸润滑脂	ZN 42-9 ZN 42-8 ZN 42-1
锂基(L)	航空(45)	2号锂基润滑脂 2号航空润滑脂	ZL-2 ZL 45-2
铝基(U)	船用(43)	2号铝基润滑脂 1号船用润滑脂 3号船用润滑脂	ZU-2 ZU 43-1 ZU 43-3
钡基(B)	密封(10)	3号钡基润滑脂 2号多效密封润滑脂	ZB-3 ZB 10-2
铅基(Q)	密封(10)	耐醇密封润滑脂	ZQ 10
其他皂基(A)	密封(10)	5号耐汽油密封润滑脂	ZA 10-5

分　组	分　级	命　名	代　号
钙-钠基 (GN)		2号钙-钠基润滑脂 3号钙-钠基润滑脂 2号合成钙-钠基润滑脂 3号合成钙-钠基润滑脂	ZGN-2 ZGN-3 ZGN-2 H ZGN-3 H
	工　业 (40)	1号压延机用润滑脂 2号压延机用润滑脂	ZGN 40-1 ZGN 40-2
钙铝基 (GU)		3号钙铝基润滑脂	ZGU-3
铝钡基 (UB)	船　用 (43)	3号推进器润滑脂	ZUB 43-3
铅钡基 (QB)	航　空 (45)	1号航空润滑脂	ZQB 45-1
复合钙基 (FG)		1号复合钙基润滑脂 2号复合钙基润滑脂 3号复合钙基润滑脂 4号复合钙基润滑脂 3号石墨复合钙基润滑脂 4号石墨复合钙基润滑脂 3号二硫化钼复合钙基润滑脂 4号二硫化钼复合钙基润滑脂	ZFG-1 ZFG-2 ZFG-3 ZFG-4 ZFG-3 S ZFG-4 S ZFG-3 E ZFG-4 E
复合铝基 (FU)		1号复合铝基润滑脂 2号复合铝基润滑脂 3号复合铝基润滑脂 4号复合铝基润滑脂	ZFU-1 ZFU-2 ZFU-3 ZFU-4
烃　基 (J)		石墨烃基润滑脂 4号石墨烃基润滑脂	ZJ-S ZJ-4 S
	仪　表 (53)	3号仪表润滑脂	ZJ 53-3
特　种 (T)		特11号润滑脂 特12号润滑脂 特21号润滑脂 特22号润滑脂 特23号润滑脂 特24号润滑脂 特25号润滑脂 特26号润滑脂 特41号润滑脂	ZT-11 ZT-12 ZT-21 ZT-22 ZT-23 ZT-24 ZT-25 ZT-26 ZT-41

5　电器用油产品的分组、命名和代号

5.1　电器用油产品的分组

电器用油的分组是按其使用于电器设备的类型不同而分为变压器油、油开关油、电容器油、电缆油和特种电器油等5组。其组别符号用汉语拼音字母表示，如表2.1.3-13所示。

表 2.1.3-13 **电气用油分组及符号**

序　　号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
名　　称	变压器油	油开关油	电容器油	电 缆 油	特种电器油
符　　号	B	U	D	L	T

各组电器用油产品，再分为若干牌号。变压器油、油开关油的牌号用凝点划分，其符号用凝点数值的阿拉伯数字表示。电缆油和特种电器油以击穿电压（千伏数）划分，牌号符号用击穿电压的千伏数值的阿拉伯数字表示。电容器油的牌号则按用途分为 1 号和 2 号。

5.2 电器用油产品的命名

电器用油产品名称由牌号名称和组别名称两部分组成。排列次序为牌号名称在前，组别名称在后，如 10 号变压器油。

5.3 电器用油产品的代号

电器用油产品代号由 3 部分组成，按排列顺序分别为类别符号(用汉语拼音字母“D”表示)、组别符号和牌号。如 330 kV电缆油的代号为DL-330，10 号变压器油的代号为DB-10，1 号电容器油的代号为DD-1。

6 真空油脂产品的分组、命名和代号

6.1 真空油脂产品的分组

真空油脂产品按使用于真空泵的种类而划分为真空泵油、增压泵油、扩散泵油、真空封脂、真空封蜡、真空封泥等 6 组。其组别符号分别用汉语拼音字母表示，如表 2.1.3-14 所示。

表 2.1.3-14 **真空油脂产品分组及符号**

组　　别	真空泵油	增压泵油	扩散泵油	真空封脂	真空封蜡	真空封泥
符　　号	K	Y	S	Z	L	N

真空油脂产品中扩散泵油的牌号按极限真空度进行划分，真空封泥组及真空封蜡组的牌号按使用温度（℃）划分，其它组的牌号则按顺序号以阿拉伯数字表示。

6.2 真空油脂产品的命名

真空油脂产品名称由牌号名称和组别名称两部分组成。其排列次序为牌号名称在前，组别名称在后，如 1 号真空泵油。

6.3 真空油脂产品的代号

真空油脂产品的代号由 3 部分组成，按排列顺序分别为类别符号（以汉语拼音字母“K”表示)。组别符号和牌号符号。如 1 号真空泵油的代号为KK-1，80 号真空封蜡的代号为KL-80，30 号真空封泥的代号为KN-30。

表 2.1.3-15 为电器用油和真空油脂产品的分组、命名和代号。

表 2.1.3-15　电器用油和真空油脂产品的分组、命名和代号举例

分　类	分　组	命　名	代　号
电器用油	变压器油	10 号变压器油 25 号变压器油 45 号变压器油	DB-10 DB-25 DB-45
	油开关油		
	电容器油	1 号电容器油 2 号电容器油	DD-1 DD-2
	电缆油	35 kV 电缆油 110 kV 电缆油 220 kV 电缆油 330 kV 电缆油	DL-35 DL-110 DL-220 DL-330
真空油脂	真空泵油	1 号真空泵油	KK-1
	扩散泵油	1 号扩散泵油 2 号扩散泵油 3 号扩散泵油	KS-1 KS-2 KS-3
	增压泵油	1 号增压泵油	KY-1
	真空封脂	1 号真空封脂 2 号真空封脂 3 号真空封脂 4 号真空封脂	KZ-1 KZ-2 KZ-3 KZ-4
	真空封蜡	30 号真空封蜡 50 号真空封蜡 80 号真空封蜡	KL-30 KL-50 KL-80
	真空封泥	30 号真空封泥	KN-30

7　液压油类产品的分组、命名和代号

7.1　液压油类产品的分组

液体传动系统用工作介质按其液体用途分为液压传动系统用（包括液压油和液压液）与液力传动系统用（包括液力油）用 2 个大组。各组工作介质又根据其主要使用特性和化学组成的不同分成若干小组，组别名称和组别符号见表 2.1.3-16。

表 2.1.3-16　液压油类产品的分组及符号

组　别		符　号	组　别		符　号
液压传动系统 （液压油和液压液）	普　通 抗　磨 低　温 高粘度指数	A B C D	液压传动系统 （液压油和液压液）	油包水 水-乙二醇 磷酸酯 其　他	RB RC RD —
	专　用 水包油	— RA	液力传动系统 （液力油）	普　通 抗　磨	LA LB

专用液压油组又根据其使用对象分为航空、舰用、减震、炮用和汽车制动等级别。

同组、同级的产品下再分列牌号。液压油和液力油的牌号按 40℃ 时的运动粘度中心值（mm^2/s）表示，数字前加前缀“IN”，以区别于按 50℃ 时的运动粘度值分列的牌号。液压液一般以特定的阿拉伯数字表示。

同组、同级和同牌号的产品，在必要时可设尾注号区分之。尾注号的意义为：

H——表示由石油烃叠合或缩合等工艺制得的产品；

G——表示具有良好的粘、滑特性，以减少导轨的爬行现象；

D——表示具有良好的低温性能；

K——表示对镀银部件具有良好的抗腐蚀性能。

7.2 液压油类产品的命名

液压油类产品中，由矿物油或由石油烃类经叠合或缩合等工艺制得的产品均称为液压油或液力油，而水包油和油包水乳化液及其它化工产品均称液压液。

产品的命名按以下排列顺序表示：



如N 32 号普通液压油（代号：YA-N 32）、N 46 K号抗腐液压油（代号：YB-N 46 K）、5 号水包油液压液（代号：YRA-5）、201 号汽车制动液压液等。

7.3 液压油类产品的代号

液压油类的固定符号用汉语拼音字母“Y”表示。产品的代号(按排列顺序先后)由类号、组号、牌号、尾注号 4 部分组成。如YA-N 68 G（N 68 G号普通液压油）、YB-N 32（N 32 号抗磨液压油）、YLA-N 32（N 32 号普通液力油）等。

液压油类产品的分组、命名和代号举例见表 2.1.3-17。

表 2.1.3-17　**液压油类产品的分组、命名和代号**

分组					级别	命名	代号	本标准采用的新牌号（按 40℃粘度分）	相近的原牌号（按 50℃粘度分）
一般应用	组成和特性	类号	组号	组别					
液压传动系统（液压油和液压液）	精制矿油					属本组产品可暂以采用机械油代用			20 30
	有良好抗氧和防锈性能的精制矿油					属本组产品可暂以采用汽轮机油（目前仅加抗氧剂）代用			20 30
	有良好抗氧、防锈和一般抗磨性能的精制矿油	Y	A	普通		N 32 号普通液压油	YA-N 32	N 32	20
						N 46 号普通液压油	YA-N 46	N 46	30
						N 68 号普通液压油	YA-N 68	N 68	40
						N 32 G号普通液压油	YA-N 32 G	N 32	20
						N 68 G号普通液压油	YA-N 68 G	N 68	40
	有良好抗氧、防锈和抗磨性能的精制矿油	Y	B	抗磨		N 32 号抗磨液压油	YB-N 32	N 32	20
						N 46 号抗磨液压油	YB-N 46	N 46	30
						N 68 号抗磨液压油	YB-N 68	N 68	40
						N 100 号抗磨液压油	YB-N 100	N 100	60
						N 150 号抗磨液压油	YB-N 150	N 150	80
						N 46 K号抗磨液压油	YB-N 46 K	N 46	30

分组 一般应用	组成和特性	类号	组号	组别	级别	命名	代号	本标准采用的新牌号（按40℃粘度分）	相近的原牌号（按50℃粘度分）
液压传动系统（液压油和液压液）	有良好抗氧、防锈、抗磨、低温性能和良好粘温性能的精制矿油	Y	C	低温		N 15号低温液压油	YC-N 15	N 15	10
						N 32号低温液压油	YC-N 32	N 32	20
						N 46号低温液压油	YC-N 46	N 46	30
						N 68号低温液压油	YC-N 68	N 68	40
						N 46 D号低温液压油	YC-N 46 D	N 46	30
	粘温性能比YC油更好的油	Y	D	高粘度指数		N 32 H号高粘度指数液压油	YD-N 32 H	N 32	20
	高粘度指数、低凝点油和其他油			专用	舵机	舵机液压油			
					航空	N 15号航空液压油		N 15	10
					减震	减震液压油			
					炮用	合成锭子油 炮用液压油			
					舰用	舰用液压油			
					汽车制动	N 10号汽车制动(液压)油 N 15号汽车制动(液压)油		N 10 N 15	7 9
						101号汽车制动(液压)液 103号汽车制动(液压)液			
						201号汽车制动(液压)液 202号汽车制动(液压)液			
						301号汽车制动(液压)液			
	水包油乳化液	Y	RA	水包油		5号水包油液压液 10号水包油液压液 15号水包油液压液 20号水包油液压液	YRA-5 YRA-10 YRA-15 YRA-20		
	油包水乳化液	Y	RB	油包水		油包水液压液	YRB		
	水-乙二醇溶液	Y	RC	水-乙二醇		水-乙二醇液压液	YRC		
	磷酸酯及其矿油混合物	Y	RD	磷酸酯		3号磷酸酯液压液 4号磷酸酯液压液	YRD-3 YRD-4		
						101号磷酸酯液压液 102号磷酸酯液压液	YRD-101 YRD-102		
	其他液力液								
液力传动系统（液力油）	有良好抗氧、防锈和抗磨性能的精制矿油	Y	LA	普通		N 32号普通液力油 N 46号普通液力油 N 46 D普通液力油	YLA-N 32 YLA-N 46 YLA-N 46 D	N 32 N 46 N 46	6（100℃时） 8（100℃时） 8（100℃时）
	抗磨性能比YLA油更高的油	Y	LB	抗磨		N 68号抗磨液力油	YLB-N 68	N 68	9（100℃时）

第4章　石油产品的主要理化指标及其意义

1　密度与相对密度

密度是在温度为t（℃）时单位体积的质量，其常用单位为kg/m^3或g/cm^3。报告密度时要指明温度。在20℃时的密度称标准密度，以ρ_{20}表示。

相对密度是石油产品在20℃时的密度（ρ_{20}）与4℃时水的密度的比值，是无量纲的。应该注意，国外石油产品的相对密度一般为15.6℃时的石油产品密度与15.6℃时的水的密度之比。

2　凝点

深色石油产品在试验条件下冷却到液面不移动时的最高温度，称为凝点。

3　闪点

石油产品在规定的条件下加热到它的蒸气与空气的混合气接触杯火焰发生闪火时的最低温度，称为闪点。根据测试仪器的不同，分为开口杯法闪点和闭口杯法闪点。闭口杯法适用于测定润滑油与深色石油产品的闪点。

闪点是表示石油产品蒸发倾向和安全性的指标。闪点在45℃以下的为易燃品，45℃以上的为可燃品。

4　馏分和馏程

将原油放入实沸点蒸馏装置中蒸馏，即经过加热、气化、冷凝等过程。此时，原油中的低沸点组分首先蒸发出来，随着蒸馏温度的不断提高，高沸点组分则相继蒸出。蒸馏时馏出的第一滴油品的气体温度称初馏点，蒸馏到最后达到的气体最高温度称干点（或称终馏点）。在一定温度范围内蒸馏出的油品称馏分。每个馏分的初馏点和干点称该油品的馏程。

根据原油的馏分与馏程，可以大致判断其产品的分布和产率。

5　辛烷值

辛烷值是表示汽油及其组分的抗爆性的指标。它在数值上等于和汽油抗爆性相同的标准混合物（由相当于辛烷值为100的异辛烷和相当于辛烷值为0的正庚烷组成）中，异辛烷的体积百分含量。汽油的牌号是按辛烷值的大小来区分的。

6　十六烷值

十六烷值是表示柴油自燃性的指标。它在数值上等于和柴油自燃性相等的标准燃料（由相当于十六烷值为100的正十六烷与相当于十六烷值为零的α-甲基萘组成）中，所含正十六烷的体积百分数。

7　粘度

粘度分动力粘度、运动粘度及条件粘度等。

7.1 动力粘度

当面积各为1 cm^2并相距1 cm的两层液体，以1 cm/s的速度作相对运动时，所产生的阻力即为动力粘度。动力粘度的单位是“Pa·s”。在温度t时的动力粘度用符号η_t表示。

动力粘度又称绝对粘度。

7.2 运动粘度

在相同温度下，液体的动力粘度与它的密度之比称运动粘度。运动粘度的单位是m^2/s；通常在实际中使用厘斯（cSt），也就是$10^{-6}m^2/s$（即1 cSt＝1 mm^2/s）。在温度t时的运动粘度用符号V_t表示。

$$V_t=\frac{\eta_t}{\rho_t}$$

7.3 条件粘度

条件粘度有恩氏粘度、赛氏粘度。

7.3.1 恩氏粘度

恩氏粘度是试样在某温度从恩氏粘度计流出200 ml所需的时间与蒸馏水在20℃流出相同体积所需的时间（s）（即粘度计的水值）之比。温度t时的恩氏粘度，用符号E_t表示。恩氏粘度的单位为条件度，用符号°E代表。

7.3.2 雷氏粘度

雷氏粘度是指50 cm^3的油在规定温度（37.78℃或100°F）下流经标准孔径的雷氏粘度计所需的时间（s）。比较通用的为雷氏一号（Red. Nol）粘度。

7.3.3 赛氏粘度

赛氏粘度是指60 cm^3的油在规定温度（37.78℃或100°F）下流经标准孔径的赛氏粘度计所需的时间（s）。

各粘度值之间的换算关系如下：

1）运动粘度（mm^2/s）乘
- 0.132＝恩氏粘度（°E）
- 4.05＝雷氏粘度（s）
- 4.62＝赛氏粘度（s）

2）恩氏粘度（°E）乘
- 7.58＝运动粘度（mm^2/s）
- 30.7＝雷氏粘度（s）
- 35.11＝赛氏粘度（s）

3）雷氏粘度（s）乘
- 0.247＝运动粘度（mm^2/s）
- 0.0326＝恩氏粘度（°E）
- 1.14＝赛氏粘度（s）

4）赛氏粘度（s）乘
- 0.216＝运动粘度（mm^2/s）
- 0.0285＝恩氏粘度（°E）
- 0.877＝雷氏粘度（s）

常用粘度范围内的粘度换算可直接查阅表2.1.4-1。

表 2.1.4-1

粘 度 换 算 表

运动粘度 (mm²/s)	恩氏粘度 (°E)	赛氏粘度 (s)	雷氏一号粘度 (s)	运动粘度 (mm²/s)	恩氏粘度 °(E)	赛氏粘度 (s)	雷氏一号粘度 (s)
2.0	1.14	32.6	30.95	13.2	2.14	70.36	61.94
2.5	1.18	34.4	32.20	13.4	2.16	71.12	62.58
3.0	1.22	36.0	33.45	13.6	2.18	71.88	63.23
3.5	1.26	37.6	34.70	13.8	2.19	72.64	63.89
4.0	1.30	39.1	35.95	14.0	2.21	73.4	64.55
4.5	1.35	40.7	37.20	14.2	2.23	74.16	65.23
5.0	1.40	42.3	38.45	14.4	2.26	74.92	65.91
5.2	1.41	42.9	38.99	14.6	2.28	75.68	66.59
5.4	1.43	43.58	39.53	14.8	2.30	76.44	67.27
5.6	1.44	44.22	40.05	15.0	2.32	77.20	67.95
5.8	1.46	44.86	40.55	15.2	2.34	77.98	68.63
6.0	1.48	45.50	41.05	15.4	2.36	78.76	69.31
6.2	1.49	46.14	41.59	15.6	2.38	79.54	70.00
6.4	1.51	46.78	42.13	15.8	2.41	80.32	70.7
6.6	1.52	47.42	42.66	16.0	2.43	81.1	71.4
6.8	1.54	48.06	43.18	16.2	2.45	81.9	72.08
7.0	1.56	48.70	43.70	16.4	2.47	82.7	72.76
7.2	1.58	49.36	44.22	16.6	2.50	83.5	73.45
7.4	1.59	50.02	44.74	16.8	2.52	84.3	74.15
7.6	1.61	50.68	45.27	17.0	2.54	85.1	74.85
7.8	1.63	51.34	45.81	17.2	2.56	85.92	75.57
8.0	1.65	52.0	46.35	17.4	2.58	86.74	76.29
8.2	1.67	52.68	46.91	17.6	2.60	87.56	77.01
8.4	1.69	53.36	47.47	17.8	2.62	88.38	77.73
8.6	1.70	54.04	48.02	18.0	2.64	89.2	78.45
8.8	1.72	54.72	48.56	18.2	2.66	90.02	79.17
9.0	1.74	55.4	49.1	18.4	2.68	90.84	79.89
9.2	1.76	56.08	49.68	18.6	2.71	91.66	80.62
9.4	1.78	56.76	50.26	18.8	2.73	92.48	81.36
9.6	1.80	57.44	50.84	19.0	2.75	93.3	82.1
9.8	1.81	58.12	51.42	19.2	2.77	94.14	82.84
10.0	1.83	58.8	52.0	19.4	2.8	94.98	83.58
10.2	1.85	59.5	52.58	19.6	2.82	95.82	84.31
10.4	1.87	60.2	53.16	19.8	2.84	96.66	85.03
10.6	1.89	60.9	53.76	20.0	2.87	97.5	85.75
10.8	1.91	61.60	54.38	20.2	2.89	98.34	86.49
11.0	1.92	62.3	55.0	20.4	2.91	99.18	87.23
11.2	1.94	63.02	55.62	20.6	2.93	100.0	87.98
11.4	1.96	63.74	56.24	20.8	2.96	100.9	88.74
11.6	1.98	64.46	56.86	21.0	2.98	101.7	89.5
11.8	2.00	65.18	57.48	21.2	3.00	102.6	90.26
12.0	2.02	65.9	58.1	21.4	3.02	103.4	91.02
12.2	2.04	66.64	58.72	21.6	3.05	104.3	91.77
12.4	2.06	67.38	59.34	21.8	3.07	105.1	92.51
12.6	2.08	68.12	59.98	22.0	3.1	106.0	93.25

续上表

运动粘度 (mm²/s)	恩氏粘度 (°E)	赛氏粘度 (s)	雷氏一号粘度 (s)	运动粘度 (mm²/s)	恩氏粘度 °(E)	赛氏粘度 (s)	雷氏一号粘度 (s)
12.8	2.1	68.86	60.64	22.2	3.12	106.9	94.01
13.0	2.12	69.6	61.3	22.4	3.14	107.7	94.77
22.6	3.17	108.6	95.53	32.2	4.34	150.6	133.1
22.8	3.19	109.4	96.29	32.4	4.37	151.5	133.9
23.0	3.21	110.3	97.05	32.6	4.39	152.4	134.7
23.2	3.23	111.2	97.81	32.8	4.42	153.3	135.5
23.4	3.26	112.0	98.57	33.0	4.44	154.2	136.3
23.6	3.28	112.9	99.34	33.2	4.47	155.1	137.1
23.8	3.31	113.7	100.1	33.4	4.49	156.0	137.9
24.0	3.33	114.6	100.9	33.6	4.52	156.9	138.6
24.2	3.35	115.5	101.7	35.8	4.54	157.8	139.4
24.4	3.38	116.3	102.4	34.0	4.57	158.7	140.2
24.6	3.40	117.2	103.2	34.2	4.59	159.9	141.0
24.8	3.43	118.0	103.9	34.4	4.62	160.5	141.8
25.0	3.45	118.9	104.7	34.6	4.64	161.4	142.6
25.2	3.47	119.8	105.5	34.8	4.67	162.3	143.4
25.4	3.50	120.7	106.2	35.0	4.69	163.2	144.2
25.6	3.52	121.5	107.0	35.2	4.72	164.1	145.0
25.8	3.55	122.4	107.8	35.4	4.74	165.0	145.8
26.0	3.57	123.3	108.6	35.6	4.77	165.9	140.6
26.2	3.59	124.2	109.4	35.8	4.79	166.8	147.4
26.4	3.62	125.1	110.1	36.0	4.82	167.7	148.2
26.6	3.64	126.0	110.9	36.2	4.85	168.6	149.0
26.8	3.67	126.8	111.7	36.4	4.87	169.5	149.8
27.0	3.69	127.7	112.5	36.8	4.92	171.3	151.4
27.2	3.72	128.6	113.3	37.0	4.95	172.2	152.2
27.4	3.74	129.5	114.1	37.2	4.98	173.1	153.0
27.6	3.77	130.3	114.9	37.4	5.00	174.0	153.8
27.8	3.79	131.2	115.7	37.6	5.03	174.9	154.6
28.0	3.82	132.1	116.5	37.8	5.05	175.8	155.4
28.2	3.84	133.0	117.3	38.0	5.08	176.7	156.2
28.4	3.86	133.9	118.0	38.2	5.10	177.6	157.0
28.6	3.89	134.7	118.8	38.4	5.13	178.5	157.8
28.8	3.91	135.6	119.6	38.6	5.15	179.4	158.7
29.0	3.94	136.5	120.4	36.8	5.18	180.3	159.5
29.2	3.96	137.4	121.2	39.0	5.20	181.2	160.3
29.4	3.99	138.3	122.0	39.2	5.23	182.1	161.1
29.6	4.01	139.1	122.8	39.4	5.25	183.0	161.9
29.8	4.04	140.0	123.6	39.6	5.28	183.9	162.7
30.0	4.07	140.9	124.4	39.8	5.30	184.8	163.5
30.2	4.09	141.8	125.2	40.0	5.33	185.7	164.3
30.4	4.12	142.7	126.0	40.2	5.35	186.6	165.1
30.6	4.14	143.5	126.7	40.4	5.38	187.5	165.9
30.8	4.17	144.4	127.5	40.6	5.41	188.4	166.7
31.0	4.19	145.3	128.3	40.8	5.43	189.3	167.5
31.2	4.22	146.2	129.1	41.0	5.46	190.2	168.3
31.4	4.24	147.1	129.9	41.2	5.49	191.1	169.1
31.6	4.27	147.9	130.7	41.4	5.51	192.0	169.9
31.8	4.29	148.8	131.5	41.6	5.54	192.9	170.7
32.0	4.32	149.7	132.3	41.8	5.56	193.8	171.5

续上表

运动粘度 (mm²/s)	恩氏粘度 (°E)	赛氏粘度 (s)	雷氏一号粘度 (s)	运动粘度 (mm²/s)	恩氏粘度 °(E)	赛氏粘度 (s)	雷氏一号粘度 (s)
42.0	5.59	194.7	172.3	51.6	6.83	238.8	211.2
42.2	5.61	195.6	173.1	51.8	6.86	239.7	212.0
42.4	5.62	196.5	173.9	52.0	6.89	240.6	212.8
42.6	5.66	197.4	174.8	52.2	6.91	241.5	21[illegible].6
42.8	5.69	198.3	175.6	52.4	6.93	242.4	214.4
43.0	5.72	199.2	176.4	52.6	6.95	243.4	215.3
43.2	5.74	200.1	177.2	52.8	6.97	244.3	216.1
43.4	5.77	201.0	178.0	53.0	6.99	245.2	216.9
43.6	5.79	202.0	178.8	53.2	7.02	246.1	217.7
43.8	5.82	202.9	179.6	53.4	7.04	247.0	218.5
44.0	5.84	203.8	180.4	53.6	7.06	248.0	219.4
44.2	5.87	204.7	181.2	53.8	7.08	248.9	220.2
44.4	5.89	205.6	182.0	54.0	7.10	249.9	221.0
44.6	5.92	206.6	182.9	54.2	7.13	250.7	221.8
44.8	5.94	207.5	183.7	54.4	7.15	251.6	222.6
45.0	5.97	208.4	184.5	54.6	7.18	252.6	223.4
45.2	6.00	209.3	185.3	54.8	7.21	253.5	224.2
45.4	6.02	210.22	186.1	55.0	7.23	254.4	225.0
45.6	6.05	211.2	186.9	55.5	7.30	256.7	227.1
45.8	6.07	212.1	187.7	56.0	7.37	259.0	229.1
46.0	6.10	213.0	188.5	56.5	7.43	261.3	231.1
46.2	6.13	213.9	189.3	57.0	7.50	263.6	233.2
46.4	6.15	214.8	190.1	57.5	7.56	265.9	235.2
46.6	6.18	215.8	191.0	58.0	7.63	268.2	237.2
46.8	6.20	216.7	191.8	58.5	7.69	270.5	239.2
47.0	6.23	217.6	192.6	59.0	7.76	272.8	241.2
47.2	6.26	218.5	193.4	59.5	7.83	275.1	243.3
47.4	6.28	219.4	194.2	60.0	7.89	277.4	245.3
47.6	6.31	220.4	195.0	60.5	7.96	279.7	247.3
47.8	6.33	221.3	195.8	61.0	8.02	282.0	249.4
48.0	6.36	222.2	196.6	61.5	8.09	284.3	251.4
48.2	6.39	223.1	197.4	62.0	8.15	286.6	253.5
48.4	6.41	224.0	198.2	62.5	8.22	288.9	255.5
48.6	6.44	225.0	199.1	63.0	8.29	291.2	257.5
48.8	6.46	225.9	199.9	63.5	8.35	293.5	259.6
49.0	6.49	226.8	200.7	64.0	8.42	295.8	261.6
49.2	6.52	227.7	201.5	64.5	8.48	298.1	263.7
49.4	6.54	228.6	202.3	65.0	8.55	300.4	265.4
49.6	6.57	229.6	203.1	65.5	8.62	302.7	267.7
49.8	6.60	230.5	203.9	66.0	8.68	305.0	269.8
50.0	6.63	231.4	204.7	66.5	8.75	307.3	271.8
50.2	6.65	232.3	205.5	67.0	8.81	309.6	273.8
50.4	6.68	233.2	206.3	67.5	8.88	311.9	275.8
50.6	6.70	234.2	207.1	68.0	8.94	314.2	277.9
50.8	6.73	235.1	207.9	68.5	9.01	316.5	279.9
51.0	6.76	236.0	208.8	69.0	9.08	318.8	281.9
51.2	6.78	236.9	209.6	69.5	9.14	321.1	284.0
51.4	6.81	237.8	210.4	70.0	9.21	323.4	286.0

7.4 SAE 粘度等级

SAE 粘度等级是由美国汽车工程师协会制定的粘度标准，广泛用来表示汽车和船舶发动机润滑油的粘度等级，每个等级具有一定的粘度范围，多数润滑油只有一个粘度等级，汽车和船舶应急设备所用润滑油有两个粘度等级，如 10 W/50，20 W/20。

表 2.1.4-2 **发动机润滑油的SAE粘度等级**

SAE 粘度等级	粘度(CP)(℃) 最 大	可泵温度(℃) 最 高	稳定倾点(℃) 最 高	粘度(cSt)(100℃) 最 小	 最 大
0 W	3250(−30℃)	−35	—	3.8	—
5 W	3500(−25℃)	−30	−35	3.8	—
10 W	3500(−20℃)	−25	−30	4.1	—
15 W	3500(−15℃)	−20	—	5.6	—
20 W	4500(−10℃)	−15	—	5.6	—
25 W	6000(− 5℃)	−10	—	9.3	—
20	—	—	—	5.6	< 9.3
30	—	—	—	9.3	<12.5
40	—	—	—	12.5	<16.3
50	—	—	—	16.3	<21.9

7.5 ISO 粘度等级

ISO 粘度等级是由国际标准化组织（ISO）对液体润滑剂制定的粘度标准。除了柴油机油和气缸油外，船舶大多数润滑油都采用这种粘度标准，测定粘度都在 40℃ 下进行。

表 2.1.4-3 **ISO 粘度等级**

粘度等级	粘度居中值 cSt(mm²/s)(40℃)	粘度范围cSt(mm²/s)(40℃) 最小	 最大	相当的SAE 粘度等级 粘度指数 100	 粘度指数 150
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42		
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52		
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06		
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48		
ISO VG 10	10	9.00	11.0		
ISO VG 15	15	13.5	16.5		
ISO VG 22	22	19.8	24.2		
ISO VG 32	32	28.8	35.2		
ISO VG 46	46	41.4	50.6	20	20
ISO VG 68	68	61.2	74.8	20	30
ISO VG 100	100	90.0	110	30	40
ISO VG 150	150	130	165	40	
ISO VG 220	220	198	242	50	
ISO VG 320	320	288	352		
ISO VG 460	460	414	506		
ISO VG 680	680	612	748		
ISO VG 1000	1000	900	1100		
ISO VG 1500	1500	1300	1650		

7.6 粘温性能

石油产品的粘度随温度而变化的性能称粘温性能。表征和衡量粘温性能可用：

1）粘温曲线；

2）粘度指数；

3)粘度温度系数（NWX）。根据试样在0℃、20℃、50℃和100℃时的运动粘度，按公式计算。

8 实际胶质

实际胶质是指100 cm^3(ml)燃油在规定的条件下蒸发后残留的胶状物质的毫克数。它适用于评定燃料（汽油、煤油、柴油）在发动机中使用时生成胶质的倾向，是表示安定性好坏的一项指标。

9 热值

1 kg燃料完全燃烧时所放出的热量称为热值，单位是kJ/kg。热值有高值与低值之分。在发动机中，通常用低热值。

10 抗乳化速度

在试验条件下将水蒸汽通入油的试样中，形成乳化液状态；油从乳化液中与水完全分离所需的时间（min），即为该油的抗乳化速度，抗乳化速度是汽轮机油的主要指标。

11 硫分

石油产品中所含硫的重量百分数称硫分。燃料中含硫是十分有害的，它会导致严重的低温腐蚀。石油产品中含硫的多少主要与原油的产地有关，同时，也受加工炼制的工艺方法的影响。

12 残炭

石油产品在试验条件下受热蒸发和燃烧后残余的炭渣物，其重量百分数即为残炭百分率。石油产品的精制程度深，其残炭就少。

13 机械杂质

石油产品用溶剂（汽油、石油醚及苯等）溶解后，经过过滤而残留的固体颗粒状物质，称机械杂质，用质量百分比表示。

14 水溶性酸或碱

水溶性酸是指存在于石油产品中能溶于水的无机酸及低分子有机酸。它对金属有较强的腐蚀作用。

水溶性碱是指在石油产品精制的过程中（如碱洗等）残留下来的氢氧化钠。它对铝有腐蚀作用。

燃油、润滑油中都不应含有水溶性酸或碱。

15 酸度

酸度是表示石油产品中酸的总含量（主要是有机酸）的指标。中和100 cm^3石油产品中有机酸所需氢氧化钾的毫克数称为酸度。石油产品在贮存、使用中，可根据这个指标的变化情况来判断其氧化变质情况。

16 总碱值

清净分散型柴油机润滑油，一般都具有大小不同的碱性，其量以总碱值表示。此指标表示润滑油中和酸性物质以及清洁、抗磨损、抗腐蚀等各方面的能力。

17 游离水分和悬浮水分

油中的水分在室温下放置数小时后能析出者称游离水分。其余的水分称为悬浮水分。悬浮水分可能是乳状的，也可能是悬浮的。

18 抗氧化安定性

石油产品受热时抵抗空气氧化的能力，称抗氧化安定性。抗氧化安定性差的石油产品容易在贮存和使用过程中变质而生成有机酸和胶状物质。

19 腐蚀度（性）

将规定的金属片（一般为铅片）放入润滑油的试样中，加热至 140℃，经 50 h的试验后，按金属片的重量变化确定试样的腐蚀度，以g/m^2表示。

对发动机燃料的腐蚀性，一般用铜片腐蚀试验法来判断，即在规定的条件下，观察发动机燃料使铜片所产生的颜色变化情况来判断试验燃料的腐蚀性。

20 沥青分

沥青分表示沥青占燃油重量的百分数。沥青是多环的大分子量的芳香烃，在油中呈胶状。沥青分大时，会使燃烧变坏，结垢增加。

21 钒、钠含量

燃油中钒、钠等金属含量虽然很少，一般仅为百万分之几，但它们却是非常有害的成分。燃烧后生成的低熔点的化合物（如五氧化二钒），粘附在高温零件（如排气阀等）的金属表面上，使零件磨损和腐蚀（高温腐蚀）。

22 清净分散性

清净分散性是表示润滑油在发动机中使用时，活塞被胶膜污染的程度。它是柴油机润滑油的重要指标之一。测定清净分散性是在标准的单缸发动机上进行。活塞完全清洁为 0 级。活塞上的胶膜增多，则其被污染的级号增大。最高为 6 级。

23 正庚烷不溶物

一定量的润滑油被正庚烷充分溶解后，在高速离心机上进行分离，被分离出来的沉淀物称为正庚烷不溶物。这是一项表示使用中润滑油被杂质污染和氧化程度的指标，以质量百分比来表示。它包括炭、锈、砂、尘、磨损颗粒及氧化生成物等。

24 苯不溶物

一定量的润滑油被苯充分溶解后，在高速离心机上进行分离，被分离出来的沉淀物称为

苯不溶物，以质量百分比表示。由于苯能溶解氧化生成物，但不能溶解炭、锈、砂、尘、磨损颗粒，因此可以这样估算润滑油中氧化物的含量，即：

氧化物％＝正庚烷不溶物％－苯不溶物％

25 针入度

针入度是指在规定的温度下（通常为 25℃），规定质量（常用 150 g）的标准圆锥体，经 5 s从润滑脂表面自由沉入润滑脂的深度。其单位为 1/10 mm。针入度是表示润滑脂软硬程度的指标。针入度的大小主要取决于润滑脂中的含皂量。含皂量少，润滑脂软，其针入度就变大。

26 游离酸、碱

游离碱是指润滑脂中与脂肪酸未作用完的碱。

游离酸是指润滑脂在贮存和使用中由于氧化而生成的酸。

27 滴点

滴点是指在规定的试验条件下，润滑脂达到一定的流动性时的温度。滴点是选用润滑脂的主要依据之一。一般应使所选用润滑脂的滴点比使用温度高 10～20℃。

滴点还可以用来判断润滑脂中稠化剂的种类。

烃基稠化剂的润滑脂滴点约在 40～70℃；

钙基稠化剂的润滑脂滴点约在 70～100℃；

钙钠基稠化剂的润滑脂滴点约在 120～135℃；

钠基稠化剂的润滑脂滴点约在 130～200℃；

锂基稠化剂的润滑脂滴点约在 170℃ 以上。

28 胶体安定性

润滑脂在长期贮存和使用中能否产生分油现象的性能，称胶体安定性。胶体安定性好，油皂就不易分离。

胶体安定性的好坏除了与润滑脂的组成有关外，与温度、压力等因素也有关，在高温、高压的作用下，胶体安定性会变坏。

第2篇 燃 料

第1章 汽油及煤油

1 汽油

汽油是汽化器式发动机的燃料。按其辛烷值的不同分为66、70、75、80、85五个牌号。选用汽油应根据发动机压缩比的大小。压缩比较低时，可选低牌号；压缩比增大时，则应选较高牌号。一般可参照表2.2.1-1选用。

表2.2.1-1 汽油的选用

压缩比	7.0以下	7.0~8.0	8.0以上
选用汽油牌号	66号或70号	75号或80号	80号或85号

66号汽油的主要质量指标（GB489—77）见表2.2.1-2。其余牌号汽油的主要质量指标（GB484—77）见表2.2.1-3。汽油含有抗爆剂四乙基铅，对人体有害。

表2.2.1-2 66号汽油的主要质量指标

项目		质量指标	试验方法
辛烷值	不小于	66	GB 503
四乙基铅含量(g/kg)	不大于	1.0	GB 377
馏程：			GB 255
10%馏出温度(℃)	不高于	79	
50%馏出温度(℃)	不高于	145	
90%馏出温度(℃)	不高于	195	
干点(℃)	不高于	205	
残留量及损失量(%)	不大于	4.5	
残留量(%)	不大于	1.5	
饱和蒸气压 (kPa)	不大于	66.66 (500 mmHg)	GB 257
实际胶质(mg/100ml)	不大于	5	GB 509
诱导期(min)	不小于	360	GB 256
硫含量(%)	不大于	0.15	GB 380
腐蚀(铜片，50℃，3 h)		合格	GB 378
水溶性酸或碱		无	GB 259
酸度(mgKOH/100ml)	不大于	3	GB 258
机械杂质及水分		无	注①

注：①将油样放入100 ml的玻璃量筒中观察，应当透明，没有悬浮和沉降的机械杂质及水。在发生争执时，按GB 511和GB 260进行测定。

②在 9 月 1 日到第二年 2 月底间，饱和蒸气压允许不大于 79.99 kPa（600mmHg）出厂。

③生产厂须保证汽油出厂后四个月内检查封样时，实际胶质不大于 10 mg/100 ml，石油公司的石油站及仓库交付用户的汽油、其实际胶质允许到 25 mg/100 ml，10%馏出温度允许增高 1℃，各中间馏出温度允许增高 2℃，干点允许增高 3℃，残馏量允许增高 0.3%。

④诱导期及酸度在加乙基液后测定，但诱导期应以出厂时测定的数据为准，封样不测定诱导期。加乙基液后酸度按 GB 379进行测定。

⑤加有四乙基铅的汽油应有明显颜色。

⑥由含硫 0.5%以上的原油生产的汽油，在有酸碱精制设备时，硫含量允许不超过 0.4%，在无精制设备时，允许不超过 0.6%。

表 2.2.1-3　　汽油的主要质量指标

项目		质量指标				试验方法
		RQ-70	RQ-75	RQ-80	RQ-85	
辛烷值	不小于	70	75	80	85	GB 503
四乙基铅含量(g/kg)	不大于	1.0	0.8	1.0	1.0	GB 377
馏程：						GB 255
10%馏出温度(℃)	不高于	79	75	75	75	
50%馏出温度(℃)	不高于	145	120	120	120	
90%馏出温度(℃)	不高于	195	180	180	180	
干点(℃)	不高于	205	195	195	195	
残留量及损失量(%)	不大于	4.5	3.5	3.5	3.5	
残留量(%)	不大于	1.5	1.5	1.5	1.5	
饱和蒸气压(kPa)	不大于	66.66 (500 mmHg)	66.66 (500 mmHg)	66.66 (500 mmHg)	66.66 (500 mmHg)	GB 257
实际胶质(mg/100ml)	不大于	5	5	5	5	GB 509
诱导期(min)	不小于	480	480	480	480	GB 256
硫含量(%)	不大于	0.15	0.15	0.15	0.15	GB 380
腐蚀(铜片，50℃，3 h)		合格	合格	合格	合格	GB 378
水溶性酸或碱		无	无	无	无	GB 259
酸度(mgKOH/100ml)	不大于	3	3	3	3	GB 258
机械杂质及水分		无	无	无	无	同注①

注：①将油样注入 100 ml的玻璃量筒中观察，应当透明，没有悬浮和沉降的机械杂质及水。在发生争执时按 GB 511和 GB 260进行测定。

②在 9 月 1 日到第二年 2 月底间，各号汽油饱和蒸气压允许不大于 79.99 kPa（600mmHg）出厂。

③生产厂须保证各号汽油出厂后四个月内检查封样时，实际胶质不大于 10 mg/100 ml，石油公司的石油站及仓库交付用户的各号汽油、其实际胶质允许到 25 mg/100 ml，10%馏出温度允许增高 1℃，各中间馏出温度允许增高 2℃，干点允许增高 3℃，残留量允许增高 0.3%。

④实际胶质，诱导期及酸度的测定，须于加乙基液前在汽油产地进行。。

⑤加有四乙基铅的汽油应有明显颜色。

⑥由含硫 0.5%以上的原油生产的RQ-70、RQ-75汽油，在有酸碱精制设备时，硫含量允许不超过 0.4%；在无精制设备时允许不超过 0.6%。

2　溶剂油

溶剂油的特点是不含四乙基铅，它可由石油的直馏馏分、铂重整抽余油或其再加工制得。溶剂油按其 98%馏出温度或干点分为 6 个牌号。其代号分别为NY-70、NY-90、NY-120、NY-190、NY-200 和NY-260。

1）NY-70 用于香花香料及油脂工业作抽提溶剂，原名香花溶剂油。

2）NY-90 用作化学试剂、医药溶剂等，原名 90 号石油醚。

3）NY-120 用于橡胶工业。

4)NY-190 用于机械零件洗涤和工农业生产作溶剂。

5)NY-200 用作油漆工业溶剂和稀释剂。

6)NY-260 煤油型特种溶剂。

溶剂油的主要质量指标（GB 1922—80）见表 2.2.1-4。

表 2.2.1-4 溶剂油的主要质量指标

项目	质量指标						试验方法
	NY-70	NY-90	NY-120	NY-190	NY-200	NY-260	
馏程： 初馏点(℃)不低于 50%馏出温度(℃) 不高于	60 —	60 —	80 —	40 140	140 —	195 —	GB 255
98%馏出温度(℃) 不高于	70	90	120	—	200		
干点(℃) 不高于	—	—	—	190	—	260	
碘值(g/100 g) 不大于	0.5	0.5	0.5	—	—	—	SYB 2301
芳香烃含量(%) 不大于	—	—	3.0	—	15	10	GB 385
硫含量(%) 不大于	0.05	0.05	0.05	—	—	—	GB 380
闪点(闭口)(℃) 不低于	—	—	—	—	33	—	GB 261
闪点(开口)(℃) 不低于	—	—	—	—	—	65	GB 267
运动粘度 20℃ (mm²/s) 不大于	—	—	—	—	—	2.4	GB 265
腐蚀(铜片,50℃,3h)	—	—	—	合格	合格	—	GB 378
油渍试验	合格	—	合格	—	—	—	同注①
机械杂质及水分	无	无	无	无	无	无	同注②
水溶性酸或碱	无	无	无	无	—	—	GB 259
密度 20℃ (g/cm³) 不大于	—	—	—	—	0.780 及注③	0.810	GB 1884 或 GB 1885
外观	无色透明	无色透明	无色透明	无色透明	无色透明	无色透明	同注②

注：①油渍试验方法——将溶剂油蒸馏试验的残留物，用小滤纸滤入干净的试管或量筒中，用吸管取其滤液往清洁的滤纸上滴 3 滴，在室温下（20±3℃）放置 30 min，如滤纸上没有油渍存在，即认为合格。

②将试样注入 100 ml的玻璃量筒中，必须透明，不允许有悬浮物和沉淀的机械杂质及水。

③用环烷基原油生产的 200 号溶剂油，其密度允许不大于 0.790 g/cm³。

④注意事项，使用本系列各种溶剂油的工作场所，空气中油气浓度不得超过 0.3 mg/l。

3 灯用煤油

灯用煤油由各种石油直馏或经精制而成。它不含裂化馏分，要求含硫量小，燃烧时没有臭味。灯用煤油适于作煤油灯、煤油炉及喷灯的燃料，也可用于洗涤机件。

煤油中严禁掺入汽油，以免发生火灾。

灯用煤油的主要质量指标（GB 253—77）见表 2.2.1—5

表 2.2.1-5 灯用煤油的主要质量指标

项目		质量指标	试验方法
密度 20℃ (g/cm³)	不大于	0.840	GB1884或1885
燃烧性(点灯试验)		合格	SY 2201
无烟火焰高度mm	不小于	20	GB 382
闪点(闭口)(℃)	不低于	40	GB 261
浊点(℃)	不高于	−12	SY 2204
馏程: 270℃馏出量(%) 干点(℃)	 不小于 不高于	 70 310	GB255
水溶性酸或碱		无	GB 259
硫含量(%)	不大于	0.1	GB 380
机械杂质及水分		无	同注①
色度(重铬酸钾溶液),号	不大于	3	GB 383

注:①将油样注入 100 ml玻璃量筒中,于室温(20±5℃)时观察,应当透明,没有悬浮和沉降的机械杂质及水。遇有争执时,按GB 511和GB 260进行测定。

②无烟火焰高度生产厂负责保证,可不检验。

第 2 章　轻　柴　油

1　轻柴油的种类及牌号

船舶用的轻柴油，在国外通常称为 MGO（Marine Gas Oil），也有称为 LDO（Light Diesel Oil），GO（Gas Oil）以及 Marine Diesel Gas Oil, Marine Diesel Medium, Bunker Gas Oil等名称。

1.1　国产轻柴油的种类及牌号

轻柴油、农用柴油、军用柴油、－30 号（甲）、－60 号轻柴油的牌号及主要质量指标分别见表 2.2.2-1～表 2.2.2-4。

表 2.2.2—1　　轻柴油（GB252—81）

项目		质量指标					试验方法
		10 号	0 号	－10 号	－20	－35 号	
十六烷值	不小于	50	50	50	45	43	GB 386
馏程：							GB 255
50%馏出温度（℃）	不高于	300	300	300	300	300	
90%馏出温度（℃）	不高于	355	355	350	350	—	
95%馏出温度（℃）	不高于	365	365	—	—	350	
运动粘度 20℃ (mm^2/s)		3.0～8.0	3.0～8.0	3.0～8.0	2.5～8.0	2.5～7.0	GB 265
10%蒸余物残炭（%）	不大于	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	GB 263
灰分（%）	不大于	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	GB 508
硫含量（%）	不大于	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	GB 380
机械杂质		无	无	无	无	无	GB 511
水分（%）	不大于	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	GB 260
闪点（闭口）（℃）	不低于	60	60	60	60	50	GB 261
腐蚀（铜片，50℃，3 h）		合格	合格	合格	合格	合格	GB 378
酸度（mgKOH/100ml）	不大于	10	10	10	10	10	GB 258
凝点（℃）	不高于	10	0	－10	－20	－35	GB 510
水溶性酸或碱		无	无	无	无	无	GB 259
实际胶质（mg/100ml）	不大于	70	70	70	70	70	GB 509

表 2.2.2-2　　农用柴油（SY1077—77）

项目		质量指标	试验方法
十六烷值	不小于	40	GB 386
馏程：350℃馏出量（%）	不小于	80	GB 255
运动粘度 50℃ (mm^2/s)	不大于	6	GB 265
灰分（%）	不大于	0.025	GB 508

续上表

项目		质量指标	试验方法
机械杂质(%)	不大于	0.01	GB 511
硫含量(%)	不大于	0.2	GB 380
水分(%)	不大于	痕迹	GB 260
闪点(闭口)(℃)	不低于	60	GB 261
凝点(℃)	不高于	20	GB 510
水溶性酸或碱		无	GB 259
残炭(%)	不大于	0.4	GB 268

表 2.2.2-3　军用柴油(GB 2021—80)

项目		质量指标			试验方法
		-10号	-35号	-50号	
外观		透明			目测
十六烷值	不小于	50	40		GB 386
馏程 10%馏出温度(℃) 50%馏出温度(℃) 90%馏出温度(℃)	 不低于 不高于 不高于	 — 280 	 200 275 335		GB 255
运动粘度 20℃ (mm^2/s)	不小于	3.5	3.5	3.0	GB 265
10%蒸余物残炭(%)	不大于	0.3			GB 263
灰分(%)	不大于	0.01			GB 508
硫含量(%)		0.2			GB 380
机械杂质		无			GB 511
水分(%)		无			GB 260
腐蚀(铜片，50℃，3h)		合格			GB 378
酸度(mgKOH/100ml)	不大于	5			GB 258
凝点(℃)	不高于	-10	-35	-50	GB 510
浊点(℃)		实测			SY 2204
水溶性酸或碱		无			GB 259
实际胶质(mg/100ml)	不大于	10			GB 509
密度 20℃ (g/cm^3)		实测			GB 1884 或GB 1885
闪点(闭口)(℃)	不低于	80	50		GB 261

表 2.2.2-4　　　　－30号(甲)、－60号轻柴油(Q/SY 11504—79)

项　　　目		质量指标		试验方法
		－30号(甲)	－10号	
十六烷值	不低于	45	40	GB 386
馏程:				GB 255
10%馏出温度(℃)	不高于		200	
50%馏出温度(℃)	不高于	300	255	
90%馏出温度(℃)	不高于		300	
95%馏出温度(℃)	不高于	350	330	
运动粘度 20℃ (mm^2/s)		1.8～3.0	2.5～4.0	GB 265
10%蒸余物残炭(%)	不大于	0.3	0.3	GB 263
灰分(%)	不大于	0.025	0.01	GB 508
机械杂质(%)		无	无	GB 511
硫含量(%)	不大于	0.2	0.2	GB 380
水分(%)	不大于	痕迹	痕迹	GB 260
腐蚀(50℃,3h,铜片)		合格	合格	GB 378
闪点(闭口)(℃)	不低于	50	35	GB 261
酸度(mgKOH/100ml)	不大于	10	5	GB 258
凝点(℃)	不高于	－30	－60	GB 510
水溶性酸或碱		无	无	GB 259
实际胶质(mg/100ml)	不大于	50	50	GB 509

1.2　国外轻柴油的种类及牌号

英国、联邦德国、美国、苏联、日本等国轻柴油标准，分别见表 2.2.2-5～表 2.2.2-9

表 2.2.2-5　　　　英国国防部柴油规格(DEF 2402B)

项　　　目		47/0	40/-40	试验方法ASTM
十六烷值	不小于	47	40	D613
运动粘度 37.8℃ (mm^2/s)		1.8～7.5	1.4	D445
馏程(℃) 50%	不大于	报告	报告	D86
90%	不大于	357	316	
干点	不大于	385	343	
倾点(℃)	不高于	－18	－40	D97
浊点(℃)	不高于	－12	－34	D2500
10%蒸余物残炭(%)	不大于	0.20	0.15	D524
含硫量(%)	不大于	1.0	1.0	D129
灰分(%)	不大于	0.01	0.01	D482
闪点(闭口)(℃)	不小于	66	38	D93
铜片腐蚀(100℃, 3h)	不大于	N0.1	N0.1	D130
酸值(mgKOH/g)	不大于	0.5	0.5	D974
水分(%)	不大于	0.05	0.05	
杂质(%)	不大于	0.01	0.01	
总沉淀物(mg/100ml)	不大于	1.0	1.0	DEF2000 方法 16 及 17

表 2.2.2-6　　联邦德国柴油国家规格(DIN51601)

项　　目		指　　标	试 验 方 法
密度 15℃ (g/ml)		0.815～0.855	DIN51757
馏程(体积%)250℃馏出	不大于	65	DIN51751
350℃馏出	不小于	85	
运动粘度，20℃ (mm²/s)		2～8	DIN51561或DIN51562
闪点 (闭口) (℃)	不小于	55	DIN51755
过滤性夏(℃)	不小于	0	DIN51428第1部分
冬(℃)	不大于	−12	
硫(重量%)	不大于	0.50	DINEN41,DIN51400第1部分及第2部分或第6部分
康氏残炭(重量%)	不大于	0.1	DIN51551
十六烷值	不小于	45	DIN51773
灰分(重量%)	不大于	0.02	DIN EN7
水分(mg/kg)	不大于	500	DIN51777第1部分或第2部分

表 2.2.2-7　　美国柴油规格(ASTM D975—78)

项　　目		1-D	2-D	4-D	试验方法ASTM
闪点	不小于	30	52	55	D39
浊点(℃)	不大于	比 90%时间的环境最低温度高 6℃			D2500
水及沉淀物(容积%)	不大于	0.05	0.05	0.05	D1976
10%蒸余残炭(%)	不大于	0.15	0.35	—	D524
灰分(%)	不大于	0.01	0.01	0.01	D482
90%馏出温度(℃)	不小于	—	282	—	D86
	不大于	288	338	—	
粘度，40℃ (mm²/s)	不小于	1.3	1.9	5.5	D445
	不大于	2.4	4.1	24.0	
含硫量(重量%)	不大于	0.50	0.50	2.0	D129
铜片腐蚀	不小于	No.3	No.3	—	D130
十六烷值	不小于	40	40	30	D613
粘度 37.8℃	不小于	—	32.6	45.0	D2161
(赛氏s)	不大于	34.4	40.1	125.0	
说　　明		变工况车用挥发性柴油	工业及重型车用低挥发性柴油	中低速柴油机用柴油	

表 2.2.2-8　　苏联国家柴油规格 [ГОСТ305—73(1977 年修改 3 号)]

项　　目		国 家 质 量 标 准				试验方法ГОСТ
		Л	З	ЗС	А	
十六烷值	不小于	49	45	45	45	3122—67
馏程(℃)50%	不大于	270	250	280	240	2177—66
90%	不大于	360	340	340	330	
运动粘度 20℃ (mm²/s),	对一般柴油机	3.0～6.0	1.8～3.2	1.8～3.2	不小于 1.5	33—66
	对火车和船用柴油机	3.5～6.0	2.2～5.0	—	—	

续上表

项目		国家质量标准				试验方法ГОСТ
		Л	З	ЗС	А	
凝点(℃)	不高于	−10	−35	−45	−55	1533—42(不预热)
浊点(℃)	不高于	−5	−25	−35	—	5066—56(第二法)
闪点(闭口)(℃)						
对火车及船用柴油机,	不低于	65	60	—	—	6356—75
对一般柴油机	不低于	40	35	35	30	
总硫(%)	不高于	0.15	0.2	0.2	0.2	19121—73
硫醇硫(%)	不大于	0.01	0.01	0.01	0.01	17323—71
硫化氢		无	无	无	无	17323—71
铜片腐蚀		通过	通过	通过	通过	6321—69
水溶性酸和碱		无	无	无	无	6307—75
机械杂质		无	无	无	无	6370—59
水分		无	无	无	无	2477—65
实际胶质(mg/100ml)	不大于	25	5	5	5	8489—58
酸度(mgKOH/ml)	不大于	2	2	2	2	5985—59
碘值 (gI/100ml)	不大于	5	1.5	1.5	1.5	2070—55
灰分(%)	不大于	0.008	0.008	0.008	0.008	1461—75
残炭 10%残渣(%)	不大于	0.20	0.20	0.20	0.20	19932—74
过滤系数	不大于	2	2	2	2	19006-73
密度 20℃ (g/cm³)	不大于	0.845	0.830	0.830	0.820	3900—47

表 2.2.2-9　日本轻柴油规格(JISK 2204—1986)

指标 / 种类	闪点(℃)	90%馏出温度(℃)	倾点(℃)	10%蒸余物残炭(重量%)	十六烷值	运动粘度 30℃ (mm²/s)	硫分(重量%)
特 1 号	50 以上	360 以下	+5 以上	0.1 以下	50 以上	2.7 以上	0.5 以下
1 号	50 以上	360 以下	−5 以下		50 以上	2.7 以上	
2 号	50 以上	350 以下	−10 以下		45 以上	2.5 以上	
3 号	45 以上	330 以下	−20 以下		45 以上	2.0 以上	
特 3 号	45 以上	330 以下	−30 以下		45 以上	1.7 以上	

1.3 国际标准组织(ISO)对船用直馏燃油的要求

表 2.2.2-10 所示为 ISO 8217：1987(E)对船用直馏燃油的要求。

表 2.2.2-10　**ISO 8217: 1987(E)对船用直馏燃油的要求**

质量指标		试验方法	极限	ISO-F-			
				DMX	DMA	DMB	DMC
密度 15℃ (kg/m³)①		ISO3675	最大	②-	890.0	900.0	920.0
运动粘度 40℃ (mm²/s)		ISO3104	最小	1.40	1.50	—	—
			最大	5.50	6.00	11.0	14.0
闪点(℃)		ISO2719	最小	43	60	60	60
上倾点③(℃)	冬季	ISO3016	最大	—	−6	0	0
	夏季		最大	—	0	6	6

续上表

质 量 指 标	试验方法	极限	ISO-F-			
			DMX	DMA	DMB	DMC
浊点(℃)	ISO3015	最大	-16④	—	—	—
10%蒸余物兰氏残炭(%)	ISO4262	最大	0.20	—	—	—
兰氏残炭(%)		最大	—	0.20	0.25	2.5
灰分(%)	ISO6245	最大	0.01	0.01	0.01	0.05
抽提法沉淀物(%)	ISO3735	最大	—	—	0.07	—
水分(体积%)	ISO3733	最大	—	—	0.3	0.3
十六烷值	ISO4264	最小	45	40	35	—
硫分(%)		最大	1.0	1.5	2.0	2.0
钒(mg/kg)		最大	—	—	—	100

① 表中的数值是每种特性的最大值或最小值。任何一批燃料的实际值可以在这些限值以内波动。
② 某些国家有最大限值。
③ 买主应确定倾点适合于船上设备，尤其当船舶在北半球和南半球都航行时。
④ 该燃料适合于气温下降至-15℃不用预热燃料。

2 轻柴油的特点及主要质量指标

2.1 轻柴油的特点

轻柴油是直馏柴油馏分以及二次加工的柴油馏分所制成的。一般理化性能范围如下：1）碳原子含量C_{10}～C_{26}。2）化学元素成分：含碳量85.5%～87%，含氢13%～14.5%，其它成分由少量硫、氮、氧的有机化合物和金属有机物组成。3）馏程一般为160～350℃。4）轻柴油密度一般为0.81～0.89 g/cm^3。5）热值为42700～46900 kJ/kg。6）十六烷值43～65。7）凝点为+10～-60℃。

2.2 轻柴油的主要质量指标

轻柴油的主要性能及质量指标主要取决于原油品质与炼制方法。

2.2.1 十六烷值

十六烷值是轻柴油最主要的特有的质量指标，表示了柴油燃烧的特性。它会影响柴油机的下列性能：1）着火性能；2）冷起动性能；3）冒烟情况；4）工作过程的平稳性；5）排气的成分。

十六烷值的大小和轻柴油的组分、原油的产地及加工方法等因素有关。

为确保柴油机正常工作，必须选用符合要求的十六烷值的柴油，一般可参考表2.2.2-11。

表 2.2.2-11 发动机转速对燃油十六烷值的要求

柴油机转速 r/min	2000以上	1500～2000	1000～1500	500～1000	500以下
要求十六烷值	50以上	45～50	40～45	35～40	25～35

2.2.2 残炭

残炭是说明柴油在燃烧室中燃烧时，产生结焦、积炭倾向的指标，它在一定程度上也表

示油品的燃烧性能。残炭中包括了机械杂质和灰分。表 2.2.2-12 表示了油品成分对形成残炭多少的影响。

表 2.2.2-12　　油品成分与残炭的关系

油品成分	形成残炭
烷烃	极少
环烷烃	中等
不饱和烃和芳香烃	较多
多环芳香烃	极多

轻柴油的主要成分是烷烃，其残炭值较小，因此，用全残炭值不够精确，故用“10%蒸余物残炭”表示，即将轻柴油蒸发掉 90%再作残炭值测定，如此得到的“10%蒸余物残炭”值较大，弥补了用全残炭值精确度不足的缺陷。我国及日、美、苏、英等国轻柴油标准中都采用这种方法。对用于高速柴油机的轻柴油，残炭值一般要求不大于 0.1，即其 10%蒸余物残炭值不高于 0.3%～0.5%。

2.2.3　灰分

灰分是油品中的矿物质形成的。它影响燃烧室积垢和发动机的磨损。轻柴油灰分主要来源于外界的机械杂质中经灼烧后不能挥发的部分。其中有：

1)加工设备腐蚀而产生金属盐和加工处理过程不完善的残留物。

2)贮运过程中混入铁锈等金属氧化物和金属盐类。

灰分的危害性是：（1）灰分进入积炭，将增加积炭的坚硬性，使气缸套与活塞环磨损增加。（2）灰分中的五氧化二钒是二氧化硫转变成三氧化硫的催化剂，使硫化物更易生成硫酸，对发动机产生腐蚀。（3）在筒状活塞柴油机中，灰分进入润滑油后，污染了润滑油。

用沉淀、过滤和分油机分离的方法可除去大部分灰分。我国国家标准中规定的轻柴油灰分不大于 0.025%，国外有关标准中规定灰分不得大于 0.005%～0.2%。

2.2.4　硫分

硫分是指油品中的含硫量，一般轻柴油含硫量较低。

硫分的危害性：

1)油品中含硫物质以元素硫、硫化氢、硫醇腐蚀作用最强，在常温下能直接腐蚀金属的称为活性硫、它可腐蚀加工和贮运设备以及柴油机燃油系统。

2)影响油品质量如变色、发臭，并使积炭变硬，增加磨损。

3)硫化物燃烧后产生二氧化硫及三氧化硫。它们遇到水分会形成亚硫酸与硫酸而腐蚀机件，产生腐蚀磨损。特别是发动机在起动初期或低温下多次起动，因燃烧室内温度低，磨损情况更为严重。

4)硫的燃烧产物二氧化硫与三氧化硫污染大气。

5)含硫燃气进入曲轴箱内，加速润滑油变质。

对高速柴油机用的轻柴油，一般要求其含硫量小于 0.5%（质量百分比）。

2.2.5　机械杂质

1)轻柴油的机械杂质主要是指不溶于溶剂的固体杂质。它来自：（1）尘土砂粒——在贮运过程中混入。（2）铁锈油污——油罐、油槽车、油船、输油管道等金属制造的设备内壁的氧化腐蚀产物和油垢。（3）过滤设备的纤维、漆皮、胶粒和容器内壁金属剥落和橡胶油管剥落等。（4）金属末——由于阀门、油泵、流量计等设备的磨损及镀锌层的脱落。

2)机械杂质的危害性：（1）阻塞滤器和喷油嘴及供油管路。（2）柴油中的杂质的粒度如果超过柴油机喷油嘴与喷油泵偶件的间隙，会引起偶件边缘的剥落；如果其粒度较小，则会进入偶件间隙，严重磨损偶件。

3)对轻柴油中机械杂质的含量要求：我国轻柴油标准中，不允许有机械杂质存在。在国外的轻柴油标准中，有部分国家允许有极少的机械杂质存在，一般范围为 0.01%～0.05%。

2.2.6 水分

1)水分的来源及存在形式

（1）在贮运使用中进入油内。（2）轻柴油具有吸水性，能从大气中或与水分接触时吸收和溶解一部分水。溶解状的水数量很少，测量与除去均很困难。悬浮状及乳化状的水，因轻柴油的密度与粘度较小，很容易分离。在标准中燃油中含有的水分是指后者。

2)水分的危害性及允许值

轻柴油中含水的危害：（1）降低热值，减少实得油量。（2）使轻柴油燃烧性能恶化，严重时，甚至导致柴油机停车。（3）如混入海水会造成腐蚀。（4）水中如果含盐，被带入气缸，则使气缸加剧磨损。（5）增加喷油泵与喷油器偶件的磨损。（6）低温使用时，水分会结冰，堵塞燃油管和滤清器，妨碍正常供油。因此限制轻柴油中水分的含量是必要的。在我国标准中，限定水分不大于痕迹（即不大于 0.025%）。

2.2.7 闪点

闪点是衡量柴油中含有的挥发性成分和可能产生爆炸、火灾危险性的指标。在使用中，柴油的闪点，主要是作为安全性指标来考虑的。

一级易燃液体：闪点（闭口）在 28℃以下；

二级易燃液体：闪点（闭口）在 28℃～60℃；

三级易燃液体：闪点（闭口）在 60℃以上。

我国与国际上的船舶规范规定了以下使用条件：

（1）船舶使用的燃油闪点（闭口）一般应不低于 60℃。

（2）应急设备使用的燃油闪点（闭口）不低于 43℃。

（3）船舶若要使用更低闪点的燃油时，必须征得验船部门的同意和采取安全措施。船舶规范中的有关规定与目前各国燃油标准中指标所规定的数值是基本符合的。如ISO“石油产品—燃油（F级）—船用燃油—技术条件”中规定，除RM级燃油闪点最低为 43℃，其他燃油闪点最低为 60℃，我国柴油国家标准对闪点要求见表 2.2.2-13。

表 2.2.2-13 **我国柴油标准对闪点的要求**

油品牌号	10 号	0 号	−10 号	−20 号	−35 号
闪点(闭口)不低于(℃)	60	60	60	60	50

轻柴油在船上使用时，如需要加温，在大气压力下，其加热温度须低于闪点(闭口)10～20℃，才能保证安全；在压力系统中，加温温度允许高于闪点（闭口），但要防止温度过高。

2.2.8 酸度

酸度反映燃油中有机酸的含量。酸度是保证油品贮运容器和用油设备不受腐蚀及防止发动机喷油嘴增加结焦和积炭的指标。燃油中的有机酸主要指加工后存在的环烷酸。环烷酸以衍生物形式主要存在于柴油的馏分中，但也包括少量在燃油贮存过程中氧化生成的有机酸（羧酸）。

酸度的危害性如下：

1）有机酸含量大而且含有水分时，就能腐蚀金属，特别是腐蚀有色金属；有机酸的分子量小，则其腐蚀性大。环烷酸对金属腐蚀的结果是生成金属皂类，从而引起润滑油加速氧化，并积集在油中成为沉淀物，影响发动机的正常工作。

2）酸度大的柴油会使发动机的积炭增加，这种积炭是造成活塞环与气缸套加剧磨损和喷油器结焦的原因之一。

2.2.9 水溶性酸碱

柴油中的水溶性酸碱，主要是指加工及贮运过程中进入柴油内的可溶于水的矿物性酸碱。水溶性酸主要为矿物酸和低分子有机酸，水溶性碱主要为氢氧化钠和碳酸钠。

水溶性酸碱的危害性如下：

1）水溶性酸对钢铁及所有的金属几乎都有强烈的腐蚀作用。水溶性碱对铝和铝合金有强烈的腐蚀作用，它能和铝表面的氧化铝薄膜生成偏铝酸钠（$NaAlO_2$）。暴露出来的新金属铝，易与水分作用生成胶状氢氧化铝沉淀。这种沉淀能堵塞燃油系统中的滤网和喷油器油管。

2）柴油中的水溶性酸碱，能与大气中的水分与氧气相互作用，而引起油品氧化、胶化及分解，促使油品变质。

由于水溶性酸碱具有严重的危害性，在轻柴油出厂成品分析中是不允许水溶性酸碱存在的。

2.2.10 浊点、倾点、凝点

轻柴油不需加热。在低温条件下使用的燃料，一般以环境温度来选择相应低温性能的轻柴油，除表 2.2.2-14 中所列各种选用情况外，我国高速柴油机选用的轻柴油，夏季为 0 号或 10 号，冬季南方用 0 号或 10 号，北方为－10 号，－20 号，－35 号，－50 号等等。船用应急设备可用浊点低于－16℃的轻柴油，即相当于ISO标准中有关DMX牌号的燃油。

表 2.2.2-14 **轻柴油的低温性能**

指标	特　征	互相关系	选用情况
浊点	开始析出石蜡结晶的温度，燃油出现浑浊但未失去流动性，而蜡结晶已能堵塞滤网	比凝点高 5 ～10℃	有些国家规定浊点按低于 90% 气温算　6℃
倾点	在试验仪器规定的试验条件下油品能流动的最低温度	比凝点高 3 ～5℃	有些国家规定倾点按低于环境温度 10°F算
凝点	油品失去流动的最高温度，此时大部分烃已结晶		环境温度低于凝点 5 ～ 7℃

2.2.11 实际胶质

在燃油系统中生成的胶质沉淀，易使新补入的燃油变质，堵塞滤器，影响供油与雾化。

胶质挥发性很低，高温下极易受热而分解生成积炭，聚集在气缸壁、活塞顶等部件上，降低导热系数，造成零件局部过热，增加活塞环与缸壁的磨损，堵塞喷油嘴。使用含有大量胶质的柴油，还会使排气阀增加结焦。

在生成胶质的氧化过程中，同时也生成部分低分子有机酸，使油品酸度增大，对燃油系统的金属产生腐蚀作用。

减少胶质生成的方法如下：

1）了解油品的来源和特性，以便采取正确的措施。不稳定的柴油不能长期贮存，贮存中应避免受光线照射。

2）降低贮存温度。

3)如贮存时间较长，油舱要尽量装满。

4)贮油容器喷涂防护涂料。

5)贮油舱柜保持清洁，及时排除水分与杂质。

2.2.12 粘度

粘度是柴油使用中的重要指标。它会影响：（1）雾化质量——粘度降低，雾化的柴油颗粒直径减少。（2）喷射距离——粘度降低，喷射距离缩短，反之增长。（3）喷射扩散度——粘度降低，扩散度增大，反之减小。（4）柴油在燃油系统中的流动与过滤阻力粘度降低——阻力减小，反之增加。（5）喷油泵与喷油嘴的精密偶件的工作——粘度过低时，偶件间润滑不良，磨损增大，柴油漏泄量增多。一般偶件可接受的最低粘度为 1.8 mm^2/s。当粘度过高时，偶件间磨擦力增大，喷射系统受力增加，喷油泵吸油量减少。

因此，中小型高速柴油机所用的燃油粘度，一般应控制在 6 mm^2/s左右。由于使用轻柴油时，通常不进行预热，为了保证适宜的进机粘度，在不同的气候条件下，对所用燃油的粘度要求也不同，详见表 2.2.2-15。

表 2.2.2-15　　高速柴油机在不同气候条件下对燃油粘度的要求(不加温)

柴油机及气候条件	要求使用的燃油粘度，20℃ (mm^2/s)
一般气候小型高速柴油机	3～5
一般气候中型高速柴油机	4～8
冬季高速柴油机	1.6
严寒地区高速柴油机	1.5
夏季高速柴油机	10

压力较大时，轻柴油的粘度会成倍地增长，如图 2.2.2-1 所示。对同一种油品，温度越高，压力对粘度影响减少；温度越低，压力对粘度影响增加。

温度是控制油品粘度的主要手段，温度升高，粘度下降。

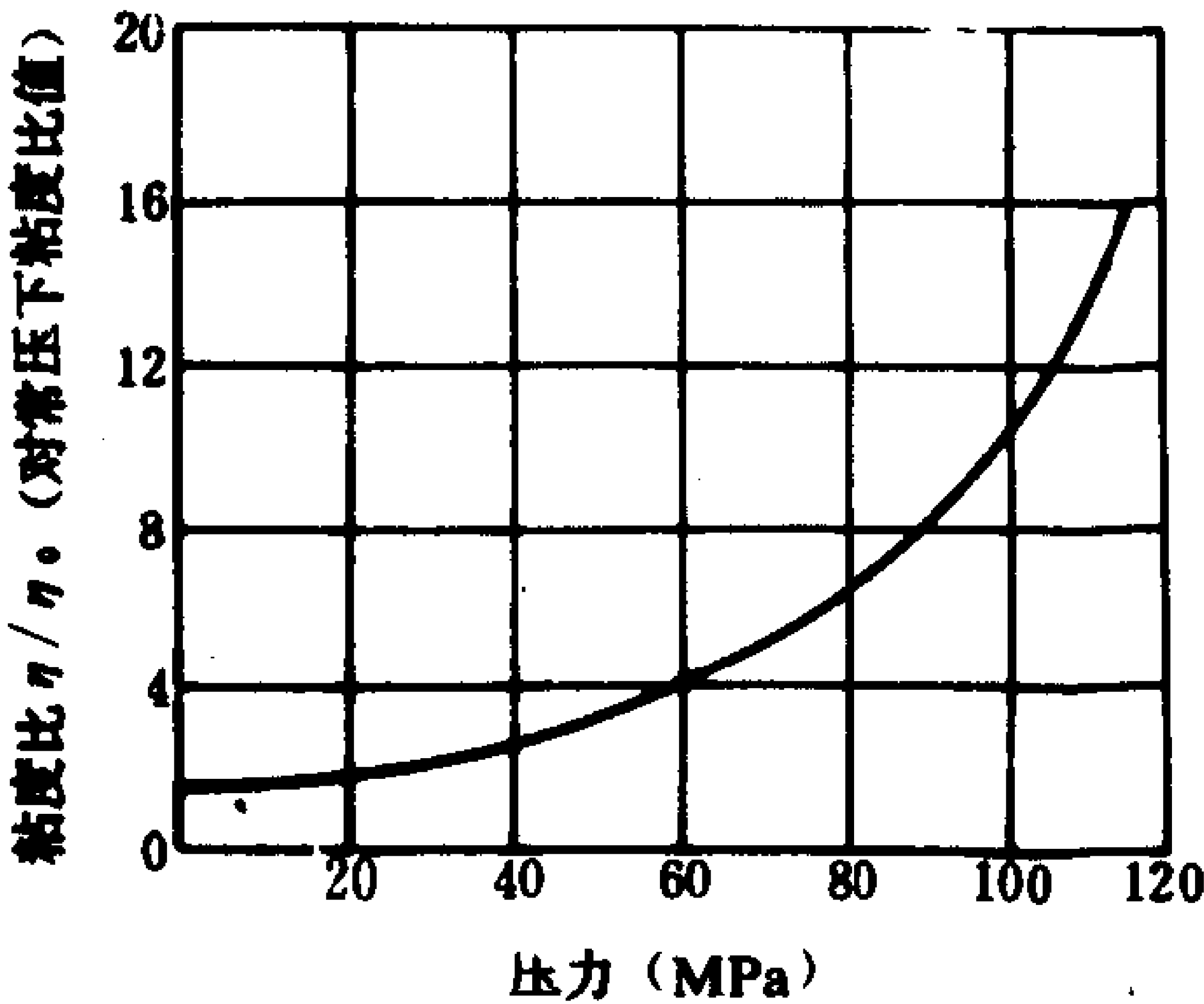


图 2.2.2-1　轻柴油机粘度随压力的变化

2.2.13 馏程

馏程反映柴油的蒸发性，它影响到柴油机的燃烧与起动，轻柴油的全馏程约为160～365℃。

柴油中轻馏分多，蒸发速度快，可燃混合气体形成也迅速，能适应高速柴油机燃烧时间极短的要求，保证了良好的燃烧。反之，柴油馏分过重，如超过 365℃的馏程，蒸发性差，形成可燃混合气的时间过长，柴油机在运转中就会产生敲缸、后燃、结炭、冒黑烟等一些不良的后果。国产零号轻柴油有关指标如表 2.2.2-16所示。

表 2.2.2-16
国产零号柴油馏出温度的规定值与实测值

50%馏出温度(℃)小于	300	实际 256～283
90%馏出温度(℃)小于	350～355	实际 305～340
95%馏出温度(℃)小于	350～365	实际 324～349

过轻馏分的燃料因粘度太低会引起高压油泵润滑不好，燃油漏泄增加。涡流式及预燃式的燃烧室受柴油馏分影响较小，可燃用较重

的馏分；直喷式燃烧室则要求使用馏分较轻的柴油。

柴油的初馏点和10%馏出温度也会影响高速柴油机的冷起动性能。由于我国轻柴油标准中对此未作规定，一般用柴油的平均蒸发性即平均馏出温度（即50%馏出温度）来估计柴油机的冷起动性能。平均馏出温度越低，起动时间越短。

2.2.14 密度

我国轻柴油标准中，无密度指标。有些国家则规定了柴油密度的最大值，使用中密度将影响下列各方面：

1）密度影响雾化性能

密度增加时，油束有效贯穿长度增加，扩散度减少，油滴尺寸增大。

2）柴油密度对沉淀物的沉淀速度有影响。轻柴油与油中所含粒子的密度差越大，沉淀速度越快。因此，限制轻柴油密度对沉淀杂质是有益处的。

3）应根据柴油的密度来正确选用分油机的调节环（比重环），使分油机达到预期的分油效果。

轻柴油密度一般为0.83～0.89 g/cm³之间。

2.2.15 铜片腐蚀试验

铜片腐蚀试验是在规定的条件下，定性地检查油中的活性硫（包括单质硫、硫化氢、二氧化硫、三氧化硫、磺酸和酸性硫酸脂等）或酸性碱性物质对金属腐蚀的情况。

我国对轻柴油进行腐蚀试验多采用将铜片放在50℃试油中浸泡3 h，然后用自测评定试片表面是否有变色或生成麻点小坑等班痕的方法，此法属于定性试验的范围。

3 轻柴油的使用

轻柴油在船舶上实际的用途是作为下列设备的燃料：

1）1000 r/min以上的高速柴油主机；

2）高速柴油发电机组；

3）应急设备柴油机；

4）救生艇柴油机；

5）生活用炉灶；

6）高度自动化燃油锅炉；

船舶应急设备往往是在船舶的安全和船员的人身安全受到严重威胁时才动用。为了使应急设备的柴油机在零下15℃时仍能正常起动，国际标准化组织（ISO）对应急设备柴油机所用燃油有严格要求，详见表2.2.2-17。

表2.2.2-17 应急柴油机的燃油要求（ISO 8217）

运动粘度，40℃（mm²/s）	最小1.40，最大5.50
闪点（℃）	最小43
浊点（℃）	最大－16
10%蒸余物残炭（%）	最大0.20
残炭（%）	最大0.14
灰分（%）	最大0.01
十六烷值	最小45
外观	清晰
硫分（%）	最大1.0

第3章　重　柴　油

1　重柴油的质量指标

1.1　粘度

国产重柴油粘度较大，50℃时为 13.5～36.2 mm^2/s。重柴油在环境温度较低时要预热使用，进机粘度可用改变加热温度来调节，因此粘度选用范围比轻柴油大。国产重柴油在使用中加热温度可参考表 2.2.3-1。

表 2.2.3-1　国产重柴油的加热温度(℃)

	20号	30号
沉淀油柜	22～25	32～35
日用油柜和过滤器	30～35	40～45
喷油嘴前	50～60	60～75

1.2　残炭

国产重柴油残炭值在 0.5%～1.5%之间，裂化重柴油残炭值为 2%～3%。它们用于中、低速柴油机时，对其使用性能影响不太大；如果用于高速柴油机，则会产生燃烧不良、积炭过多等弊病，导致故障增多，应予以注意。

1.3　硫分

重柴油主要是由 250～450℃的较重馏分组合而成的油品，重柴油的硫分是处于轻柴油与重油（燃料油）两者之间。重柴油标准中允许的含硫量为：

1)船用重柴油小于 0.5%～1.5%（重量百分比）

2)陆用重柴油一般为 1.0%以下。

我国重柴油，由于原油含硫较低，含硫量可小于 0.2%。

1.4　机械杂质与水分

重柴油中的机械杂质与水分的来源及其危害性，基本和轻柴油相同。

1.5　闪点

重柴油的闪点较高，能满足国内外船舶建造规范对船舶燃料的要求——闭口闪点高于 60℃。重柴油有时须经预热才能使用，为了安全，预热温度应低于闪点 10～20℃。为了便于重柴油与渣油混和，允许预热温度较轻柴油高。

1.6　凝点

国产重柴油由石蜡基原油炼制而成，石蜡含量，凝点相应较高。国产重柴油是以凝点作命名牌号的，10、20、30 号重柴油的凝点分别为 10、20、30℃。如果船舶动力装置中没有加热设备，则只能在环境温度高于重柴油凝点 5～7℃以上时才能使用；但是，有加热设备的动力装置则不受凝点的限制。

2 重柴油的品种与牌号

国产重柴油的品种与牌号及质量指标如表2.2.3-2所示。国外船用柴油性能见表2.2.3-3。

表2.2.3-2　**国产重柴油的牌号及质量指标**(GB 445—77)

项目		质量指标			试验方法
		10	20	30	
运动粘度, 50℃ (mm^2/s)	不大于	13.5	20.5	36.2	GB 265
残炭(%)	不大于	0.5	0.5	1.5	GB 268
灰分 (%)	不大于	0.04	0.06	0.08	GB 508
硫含量(%)	不大于	0.5	0.5	1.5	GB 387
机械杂质(%)	不大于	0.1	0.1	0.5	GB 511
水分(%)	不大于	0.5	1.0	1.5	GB 260
闪点 (闭口) (℃)	不低于	65	65	65	GB 261
凝点(℃)	不高于	10	20	30	GB 510
水溶性酸或碱		无	无	—	GB 259

注: ①由含硫0.5%以上的原油炼制的重柴油, 出厂时硫含量许可不大于2.0%, 残炭许可不大于3.0%。
②海运和河运时水分许可不大于2.0%, 但须由总量中扣除水分全部重量。
③使用重柴油的柴油机必须有完善的过滤设备和预热设备。

表2.2.3-3　**国外船用柴油性能比较表 (实测值)**

油品 \ 指标	雷氏一号粘度(s) 不大于	运动粘度 (mm^2/s) 不大于	密度 (g/cm^3) (15.56℃) 不大于	闭点(℃) (闭口) 不小于	倾点 (凝点) (℃) 不大于	残炭值 (%) 不大于	灰分 (%) 不大于	水分 (%) 不大于	硫分 (%) 不大于	钒 (ppm) 不大于	十六烷值 不小于
ISO-DMB		11.0 (40℃)	0.9 (15℃)	60	冬0夏6	0.25	0.01	0.30	2.0		35
ISO-DMC		14.0 (40℃)	0.92 (15℃)	60	冬0夏6	2.50	0.05	0.30	2.0	100	
ASTMD975-NO4D		5.5-24 (40℃)		55			0.10		2.0		30
BP公司 MDO	50	9.4 (100°F)	0.830	66	1	1.5	0.01	0.20	1.5		
法国 MORY公司 MDO	50	9.4 (100°F)	0.90	66	0	1.5	0.02	0.1	1.5		
Shell公司 馏分油	55	11.0 (100°F)				0.2	0.01	0.25	1.5		
Shell公司 掺合油	55	11.0 (100°F)				1.5	0.02	0.25	1.8		

续上表

指标 油品	雷氏一号粘度(s)不大于	运动粘度(mm²/s)不大于	密度(g/cm³)(15.56℃)不大于	闪点(℃)(闭口)不小于	倾点(凝点)(℃)不大于	残炭值(%)不大于	灰分(%)不大于	水分(%)不大于	硫分(%)不大于	钒(ppm)不大于	十六烷值不小于
日本丰岛	45	7.6 (100°F)	0.85	85	−12	0.58	0.05		0.9		
日本蝶理	40	5.6 (100°F)	0.85	60	−5	1.00	0.01	0.10	1.0		
中东(直馏)	38	5.0 (100°F)	0.85	98.9	−9.4				1.10		
委内瑞拉(直馏)	46	7.7 (100°F)	0.862	82.2	−14.4				1.04		
北非(直馏)	44.5	7.4 (100°F)	0.86	82.2	−8.9	0.09	0.05		0.05		
苏联ГОСТ1667-68ДТ		36 (50℃)	0.930 (20℃)	65	(−5)	3.0	0.04	1.0	0.5~1.5		

3 重柴油的使用

重柴油开始主要用于中低速柴油主机、辅机和小型辅助锅炉上，但由于轻重柴油的价格相差较大，故目前在中小型高速柴油中，也使用重柴油，以降低燃油费用。

然而，由于重柴油的性能较轻柴油差(如：十六烷值较低；灰分、残炭、硫分、机械杂质较多；粘度与密度较大；凝点较高等)，为了避免和减少因此而带来的一些问题，在中小型柴油机中使用重柴油时，必须采取相应的措施。

1)搞好重柴油的预热处理。正确使用沉淀、过滤、分离的方法，尽可能除去重柴油中的水分、机械杂质及部分灰分，减少其危害作用。

2)对重柴油进行必要的预热。在燃油系统中设置预热设备，可使重柴油的粘度在驳油、分油、输送和进柴油机燃烧前，降到合适的程度。

3)适当提高冷却水温度。冷却水温度较低时，使燃烧酸性产物在缸套较冷的部位凝聚后，被活塞环刮到气缸顶部燃烧室。此部分是高温高压的高负荷区，润滑又不好，易产生腐蚀磨损。

4)启动、停车及低负荷运转时改用轻柴油。这样，既可减少重柴油产生酸性腐蚀及较多的积炭等现象，也可避免停车后环境温度过低，重柴油在燃油系统中凝结。

5)重柴油与轻柴油更换时，要避免燃油系统中温度剧变，以防止喷油泵与喷油嘴偶件咬死。

第 4 章　重油(燃料油)及渣油

1　名称与种类牌号

1.1　名称

1.1.1　国内重油

1)重油（燃料油）

(1)20、60 号重油（燃料油）　由直馏和二次加工的残渣油加入一定比例的二次加工的轻油调制而成的重质燃油。

(2)100、200 号重油(燃料油)　由直馏残渣油与二次加工残渣油调合而成的重质燃油。

以上四种重油（燃料油）均以 80℃时运动粘度（mm^2/s）的值作牌号。重油原来主要用作锅炉燃料，现在也用作大型低速柴油机及中速柴油机的燃料。

2)渣油

(1)250 号重油　以 80℃时的运动粘度（mm^2/s）的值作牌号，通常称为渣油，它是由减压渣油与二次加工残渣油调合而成的燃料油。原为锅炉燃料，现用于国内沿海船舶，作为大型低速柴油机与中速柴油机掺烧的重质燃油。

(2)1 号渣油　按中国石化总公司企业标准，调合成分类似 250 号重油，只是质量指标更差，粘度更高。

3)船用内燃机燃料油

船用内燃机燃料油分为 1000 号与 1500 号两种。它们是以直馏残渣油与二次加工柴油调合而成的内燃机燃料油，供船舶中低速柴油机使用。牌号是以 37.8℃（100℉）时的雷氏 1 号粘度（s）的值来表示的。

1.1.2　国外重油（燃料油）

在国外，船用燃料油由专门的调油厂供应。调油厂根据用户的要求，将炼油厂生产的馏分油、二次加工油与残渣油，按不同比例进行调合。因此，国外船用燃料油是用粘度来表示其规格，并在不同时期采用了不同的区分粘度的方法。

1977 年 10 月以前，按 100℉的雷氏 1 号粘度进行分级及命名，如 1000 s燃料油。我国内燃机燃料油也沿用了这种命名方法。

1977 年 10 月开始采用了国际单位制（ISO 系统），以 50℃ 时的运动粘度（mm^2/s）的值来区分燃油粘度。

1987 年 4 月，国际标准化组织颁布了 ISO—8217“石油产品——燃料（*F* 级）——船用燃料规格”的国际标准。它以燃料油 100℃时燃油的运动粘度（mm^2/s）来区分与命名的。

各国对船用燃料油虽然都以粘度为主来区分及命名，但是，由于使用了不同的规格、标准以及习惯的名称，包括馏分油在内，故燃油的名称相当混乱，极易造成误解。为了便于区分，现将有关燃油名称与粘度划分范围分别列于表 2.2.4-1～表 2.2.4-3 中。

表 2.2.4-1 国外燃油的名称

	一般名称	其他名称	外形与特征
馏分油	MARINE GAS OIL 船用轻柴油	MARINE DIESEL GAS OIL MARINE DIESEL MEDIUM BUNKER GAS OIL	色泽浅淡 馏分中无残渣成分
	MARINE DIESEL OIL 船用柴油	MARINE DIESEL FUEL BUNKER DIESEL OIL	色泽较深 主要馏分中，部分带有比例很小的残渣混合物
重油	INTERMEDIATE FUELS(I.F.) 中间燃料油	INTERMEDIATE BUNKER FUELS THIN BUNKER FUEL OIL MARINE-INTERMEDIATE FUEL	用船用燃料油和船用重油或船用轻柴油，混和成各种粘度
	MARINE FUEL OIL 船用燃料油	BUNKER FUEL NO. 6 FUEL BUNKER C FUEL	重油的最粘滞的等级

表 2.2.4-2 著名油公司现用燃油名称

	BP	CHEVRON	ESSO	GULF	MOBIL	TAXACO	SHELL
船用燃料油	Marine Fuel Oil MFO	Bunker Fuel Oil	Bunker Fuel Oil BFO	Bunker C	Marine Fuel Oil MFO	Bunker C Fuel Oil	Marine Fuel Oil MFO
中间燃料油	Interfuel	Intermediate Fuel	Intermediate Fuel IF	Intermediate Fuel	Light Marine Fuel Oil LMFO	Intermediate Fuel Oil	Thin Fuel Oil TFO
船用柴油	Marine Diesel Oil MDO	Marine Diesel Oil	Marine Diesel Oil MDO	Marine Diesel Oil	Marine Diesel Oil MDO	Marine Diesel Oil	Marine Diesel Fuel MDF
船用轻柴油	Light Diesel Oil LDO	Light Diesel	Light Marine Diesel Oil LDO	Light Diesel Oil		Light Diesel Oil	Light Marine Diesel Fuel LMDF
	Gas Oil GO	Marine Gas Oil	Marine Gas Oil MGO	Marine Gas Oil	Marine Gas Oil MGO	Gas Oil	Gas Oil Go

表 2.2.4-3　**燃油粘度各种规格和习惯名称对照表**

<table>
<tr><td>粘度，50℃（mm²/s）</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>25</td><td>30</td><td>40</td><td>50</td><td>60</td><td>70</td><td>80</td><td>90</td><td>100</td><td>150</td><td>200</td><td>300</td><td>400</td><td>500</td><td>600</td><td>700</td></tr>
<tr><td>国际标准 ISO 8217</td><td colspan="2">DMB</td><td colspan="2">DMC</td><td colspan="11">RMA
RMB 10
RMC</td><td colspan="3">RMD 15</td><td colspan="2">RME 25
RMF</td><td colspan="3">RMG
RMH 35
RMK
RMJ</td><td colspan="2">RMH
RMK 45
RML</td><td colspan="2">RMH 55
RML</td></tr>
<tr><td>中国 GB 445—77 重柴油</td><td colspan="7">1100 号</td><td colspan="4">20 号</td><td colspan="3">30 号</td><td colspan="13"></td></tr>
<tr><td>中国 SY 109—77 重油（燃料油）</td><td colspan="14"></td><td colspan="6">20 号</td><td colspan="3">60 号</td><td colspan="2">100 号</td><td>200 号</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="27"></td></tr>
<tr><td>英国 BSMA 100 1982</td><td colspan="2">class
M2</td><td colspan="2">class
M3</td><td colspan="14">class
M4</td><td colspan="3">class
M5</td><td colspan="3">class
M6</td><td colspan="3">class
M7-10</td></tr>
<tr><td>英国 BSM2869 1983</td><td colspan="15">class
E</td><td colspan="5">class
F</td><td colspan="3">class
G</td><td colspan="3">class
H</td><td></td></tr>
<tr><td>美国 ASTM D396</td><td colspan="7">No4</td><td colspan="8">No5（轻）</td><td colspan="3">No5（重）</td><td colspan="8">No6</td><td></td></tr>
<tr><td>日本 JISK 2205-1980</td><td colspan="11">1 种
1 号 2 号</td><td colspan="6">2 种</td><td colspan="4">3 种
1 号</td><td colspan="2">3 种
2 号</td><td colspan="4">3 种
3 号</td></tr>
<tr><td>日本习惯称呼</td><td colspan="11">A 重油</td><td colspan="6">B 重油</td><td colspan="10">C 重油</td></tr>
<tr><td>美国习惯称呼</td><td></td><td colspan="12">Bunker A</td><td colspan="5">Bunker B</td><td colspan="9">Bunker C</td></tr>
<tr><td>美国习惯称呼</td><td colspan="17"></td><td colspan="5">LFO</td><td colspan="5">HFO</td></tr>
<tr><td>习惯名称</td><td colspan="12"></td><td colspan="7">LFO</td><td colspan="2">IFO</td><td colspan="3">HFO</td><td colspan="3">BFO</td></tr>
<tr><td>雷氏 1 号 100℉（s）
IS 系统，50℃（mm²/s）</td><td colspan="4"></td><td colspan="8">（200）
30</td><td>（280）
40</td><td>（440）
60</td><td>（610）
80</td><td>（950）
120</td><td>（1250）
150</td><td>（1500）
180</td><td>（2200）
240</td><td>2600
280</td><td>2900
320</td><td>3600
380</td><td></td><td></td><td colspan="3">（4100）420
（4600）460</td></tr>
<tr><td>欧洲习惯称呼</td><td colspan="11">LMFO</td><td colspan="6">MMFO</td><td colspan="10">HMFO</td></tr>
</table>

1.2 种类及牌号

1.2.1 国产重油（燃料油）的种类与牌号

重油（燃料油）的部标准见表 2.2.4-4。船用内燃机燃料油（企业标准）见表 2.2.4-5。国产渣油的企业标准与实际指标见表 2.2.4-6。

表 2.2.4-4　　重油（燃料油）

项目		质量标准				试验方法
		20 号	60 号	100 号	200 号	
恩氏粘度（°E）						GB 266
30℃	不大于	5.0	11.0	15.5	—	
100℃		—	—	—	5.5~9.5	
闪点(开口)（℃）	不低于	80	100	120	130	GB 267
凝点（℃）	不高于	15	20	25	36	GB 510
灰分（%）	不大于	0.3	0.3	0.3	0.3	GB 508
水分（%）	不大于	1.0	1.5	2.0	2.0	GB 260
硫含量（%）	不大于	1.0	1.5	2.0	3.0	GB 387
机械杂质（%）	不大于	1.5	2.0	2.5	2.5	GB 511

表 2.2.4-5　　船用内燃机燃料油（企业标准）

项目	质量指标					试验方法
	上海炼油厂	茂名石油工业公司	锦西石油五厂	大连石油七厂		
				1000 号	1500 号	
企业标准编号	沪Q/GQ 3-006-82	茂企 106-2-75	辽 Q 199-79	辽 Q 199-81		
密度，20℃（g/cm³）	实测	0.9600	—	—	—	GB 2640
恩氏粘度，80℃（°E） 不大于	5.0	5.0	5.0	5.0	5.6	GB 266
凝点（℃） 不高于	22	18	25	25	25	GB 510
闪点（开口）（℃） 不低于	80	80	80	80	80	GB 267
灰分（%） 不大于	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	GB 508
硫含量（%） 不大于	0.5	2.5	1.0	1.0	1.0	GB 387
机械杂质（%） 不大于	0.1	0.1	1.5	1.5	1.5	GB 511
水分（%） 不大于	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0	GB 260
残炭（%）	实测	10	—	—	—	GB 268
发热量	实测	—	—	—	—	GB 384
备注	减压渣油与二次加工柴油或直馏柴油调合而成	蒸馏装置馏分油，渣油与催化裂化装置的柴油调合	直馏渣油和热裂化柴油调制	大庆原油直馏渣油与催化裂化热裂化柴油调合而成		

表 2.2.4-6　　　　　　　　　　**国产渣油的企业标准与实际指标**

质量指标		石化总公司企业标准				石油七厂企标	
		1号渣油（重油）		250号重油（燃料油）		250号重油（燃料油）	
		标准	实测	标准	实测	标准	实测
恩氏粘度 10℃（°E）	不大于	35	20.60～31.38	25	17.72～27.85	25	18.30～20.99
运动粘度，100℃（mm²/s）	不大于	260				185	135～155.5
闪点（开口）（℃）	不低于	160	284～325	150	262～339	130	340
凝点（℃）	不大于	实测	25～32	实测	24.5～36.0	46	30～32
灰分（%）	不大于	0.3	0.014～0.048	0.3	0.0048～0.030	0.3	0.006～0.010
水分（%）	不大于	2.0	痕迹～0.26	2.0	0.012～0.263		
机械杂质（%）	不大于	3.0	0.012～0.050	2.5	0.056～0.20	2.5	0.005～0.011
密度，20℃（g/cm³）		实测	0.9277～0.9311	实测	0.9132～0.9346		

表 2.2.4-7　　　　　　　　　　**美国燃油规格　ASTM O 396**

		闪点 ℃（°F）	倾点 ℃（°F）	水分与沉淀物 体积（%）	10%蒸余物 残炭（%）	灰分重量（%）	馏出温度 ℃（°F） 10%点	90%点		运动粘度（mm²/s） 38℃（100°F）		40℃（104°F）		50℃（122°F）		相对密度 60/60°F API度	铜片腐蚀 %	硫分（%）
		最小	最大	最大	最大	最大	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最大	最大	最大
No1	馏分油指定为蒸发型燃烧器和其他燃烧器使用	38（100）	−18（0）	0.05	0.15	—	215（420）	—	288（550）	1.4	2.2	1.3	2.1	• —	—	0.8499（最小35）	No3	0.5
No2	馏分油一般打算加热不需用No1燃油的燃烧器	38（100）	−6（20）	0.05	0.35	—	—	282（540）	338（640）	2.0	3.6	1.9	3.4	—	—	0.8762 最小30	No3	0.5
No4 轻	使用与燃烧通常不需预热	38（100）	−6 20	0.05	—	0.05	—	—	—	2.0	5.8	—	—	—	—	0.8762（最大30）	—	—
No4	使用与燃烧通常不需预热	55（130）	−6（20）	0.05	—	—0.10	—	—	—	5.8	26.4	5.5	24.0	—	—	—	—	—
No5（轻）	可能预热由气候与设备决定	55（130）	—	1.00	—	0.1	—	—	—	726.4	65	7240	58	—	—	—	—	—
No5（重）	在燃烧与气候寒冷时可能要进行预热	55（130）	—	1.00	—	0.1	—	—	—	765	194	758	168	42	（81）	—	—	—
No6	在燃烧与使用时需要预热	60（140）		2.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	792	638	—	—	—

1.2.2 国外重油（燃料油）的种类与牌号

美国、日本、英国、联邦德国、苏联及法国燃料油规格标准分别见表 2.2.4-7～表 2.2.4-15。

表 2.2.4-8　　美国海军燃料油规格（MILF 8591）

项目		特种燃料油	重燃料油
密度，15.6℃，(g/cm³)	不大于	0.9895	1.00
29.5℃粘度（°BY）	不小于	6.7	—
50℃粘度（°BY）	不大于	6.7	44
残炭（%）	不大于	0.15	—
闪点(闭口)（℃）	不低于	65.6	65.6
灰分（%）	不大于	0.1	0.12
凝点（℃）	不高于	−9.4	10
不流动点（℃）	不高于	0	—
含硫（重量%）	不大于	3.5	—
水分，蒸馏法（体积%）	不大于	0.5	0.5
机械杂质（体积%）	不大于	0.12	0.15
爆炸性（%）	不大于	50	50
热安定性		合格	合格

表 2.2.4-9　　日本燃料油 JISK 2205—1980 规格

项目		1种		2种	3种			备注
		1号	2号		1号	2号	3号	
反应		中性	中性	中性	中性	中性	中性	1种和2种重油在寒冷季节使用时，倾点不高于0℃；1种重油在夏季使用时，倾点不高于10℃。
闪点（℃）	不低于	60	60	60	70	70	70	
运动粘度，50℃，(mm²/s)	不高于	20	20	50	250	400	400～1000	
倾点（℃）	不高于	5[1]	5[1]	10[1]	—	—	—	
残炭（重量%）	不高于	4	4	8	—	—	—	
水分（体积%）	不高于	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	2.0	
灰分（重量%）	不高于	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	—	
硫分（重量%）	不高于	0.5	2.0	3.0	3.5	—	—	

表 2.2.4-10　**英国船用柴油机及锅炉用石油燃料规格标准——BSMA 100　1982**

项　目 ＼ 分　类			M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12
密度，15℃ (g/cm³)		最大	—	0.9000	0.9200	0.9910	0.9910	0.9910	0.9910	0.9910	0.9910	—	—	—
运动粘度，40℃ (mm²/s)		最小	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		最大	5.50	11.00	14.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
运动粘度，80℃ (mm²/s)		最大	—	—	—	15.00	25.00	45.00	75.00	100.00	130.00	75.00	100.00	130.00
十六烷指数		最低	45	35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
兰氏残炭值（体积%）		最大	—	0.25	2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
兰氏残炭值，10%蒸余物（体积%）		最大	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
康氏残炭值（体积%）		最大	—	—	—	12.0	14.0	20.0	22.0	22.0	22.0	—	—	—
闪点(闭口)，平斯基—马丁法（℃）		最低	43.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
水分（体积%）		最大	0.05	0.25	0.30	0.50	0.80	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
抽提法沉淀物（体积%）		最高	0.01	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
灰分（体积%）		最高	0.01	0.01	0.05	0.10	0.10	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
浊点（℃）		最高	−16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
硫分（体%）		最高	1.00	2.00	2.00	3.50	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
倾点（℃）	12 月 1 日至 3 月 31 日	最低	0	0	24	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	4 月 1 日至 11 月 30 日	最低	6	6	24	30	30	30	30	30	30	30	30	30
钒（mg/kg）		最大	—	—	100	250	350	500	600	600	600	600	600	600

表 2.2.4-11 英国军用燃料油规格 DEF—2406 A

项 目		50/50 级	试 验 方 法
闪点(闭口)(℃)	不小于	65.6	BS 2839, IP 34/59
燃点, 闪点低于 79.4℃ (℃)	不小于	93.3	IP 35/42
灰分 (%)	不大于	0.10	IP 4/61
水分 (体%)	不大于	0.50	IP 74/62
提出沉淀物 (%)	不大于	0.12	Fed. std. 791～3002
硫 (%)	不大于	3.5	IP 61/61
无机酸		无	IP 1/60 方法 C
爆炸性	不大于	50	Fed. std. 791～1151
粘度, 50℃, No. 1, (s)		57～200	IP 70/62
(mm^2/s)		11.8～48.6	IP 71/62
赛氏 (s)		65～225	Fed. std. 791～304
倾点 (℃)	不大于	−9.4	IP 15/60
泵送性能, 8.9℃ (Pa · s)	不大于	15	

表 2.2.4-12 联邦德国燃料油规格 DIN 51603

项 目		EL	L	M	S
密度, 15℃ (g/cm^3)	不大于	0.86	—	—	—
95%馏出温度 (℃)	不高于	370	—	—	—
25℃粘度 (mm^2/s)	不大于	8	17	—	—
50℃粘度 (mm^2/s)	不大于	—	—	38	450
100℃粘度 (mm^2/s)	不大于	—	—	—	40
康氏残炭 (%)	不大于	0.05	2	10	15
灰分 (%)	不大于	0.01	0.04	0.07	0.15
闪点(闭口) (℃)	不低于	55	55	65	65
凝点 (℃)	不低于	−10	− 5	0	—
含硫 (%) 石油渣油	不大于	1	—	2.8	3.8
石煤渣油	不大于	—	0.8	0.9	0.9
褐煤渣油	不大于	—	2.5	1.8	—
水分 (%)	不大于	0.1	0.3	0.5	0.5
机械杂质 (%)	不大于	0.05	0.1	0.25	0.5
低热值 (kJ/kg) 石油渣油	不低于	41868	—	40193.28	39355.92
石煤和褐煤渣油,	不低于	—	9,000	9,000	9,000
加热: 运输前		无需	个别时需要	个别时需要	多半需要
燃用前		无需	个别时需要	多半需要	需 要

表 2.2.4-13 苏联燃料油规格ГОСТ 10585—75 (1977 年 3 月修改)

项 目		40 B 国家质量标记	40	100 B 国家质量标记	100	试验方法 ГОСТ
粘度, 80℃, 条件粘度(°BY)	不大于	6.0	8.0	10.0	16.0	6258—52
运动粘度(mm^2/s)	不大于	43.8	59.0	73.9	118.0	33—66 附件
灰分 (%)	不大于	0.04	0.12	0.05	0.14	1461—75
机械杂质 (%)	不大于	0.07	0.80	0.20	1.5	6370—59
水分 (重量%)	不大于	0.3	1.5	0.3	1.5	2477—65
水溶性酸和碱		无	无	无	无	6307—75
硫(重量%)低硫	不大于	0.5	0.5～1.0	0.5	0.5～1.0	
含硫	不大于	2.0	2.0	2.0	2.0	
高硫	不大于	—	3.5	—	3.5	
闪点(开口) (℃)	不小于	90	90	110	110	4333—48

续上表

项目		40 B 国家质量标记	40	100 B 国家质量标记	100	试验方法 ГОСТ
凝点（℃）	不高于	10	10	25	25	20287—74
对高含蜡原油产品	不高于	25	25	42	42	
低热值（kJ/kg）						
低硫及含硫燃料	不小于	40611.96	40611.96	40402.62	40402.62	21261—75
高硫燃料	不小于	—	39774.6	—	39774.6	21261—75
密度，20℃（g/cm³）	不大于	—	—	1.015	1.015	3900—47

表 2.2.4-14　苏联船用燃料油规格 ГОСТ 10585—75（1977 年 3 月修订）

项目		Φ5 国家质量标记	Φ5	Φ12 国家质量标记	Φ12	试验方法 ГОСТ
粘度，50℃，条件粘度（°BY）	不大于	4.0	5.0	12	12.0	6258—52
运动粘度（mm²/s）	不大于	29	36.2	89	89	33—66 附件
动力粘度，0℃，（P）	不大于	27	27	—	—	1929—51
灰分（%）	不大于	0.04	0.05	0.07	0.10	1461—75
机械杂质（%）	不大于	0.07	0.10	0.07	0.12	6370—59
水分（重量%）	不大于	0.2	0.3	0.2	0.3	2477—65
水溶性酸和碱		无	无	无	无	6307—75
硫（重量%）低硫	不大于	—	—	0.5	0.6	
含硫	不大于	1.5	2.0	—	—	
残炭（%）	不大于	6.0	6.0	6.0	6.0	19932—74
胶质（%）	不大于	50	50	50	50	2550—44
硫化氢		无	无	—	—	
闪点（闭口）（℃）	不低于	80	80	90	90	6356—75
凝点（℃）	不高于	−7	−5	−8	−8	20287—74
低热值（KJ/kg）	不小于	41323.716	41323.716	41323.716	41323.716	21261—75

表 2.2.4-15　法国燃料油规格

项目		民用	轻质	1号	2号
密度，15℃（g/cm³）		0.85—0.88	0.9～0.94	0.93～0.96	0.93～0.98
250℃馏出（%）	不大于	—	—	—	—
270℃馏出（%）	不大于	50	50	50	50
20℃粘度（°BY）	不大于	2	6.5	—	—
50℃粘度（°BY）	不大于	—	—	14	50
闪点（开口）（℃）		70	70～140	70～140	70—190
凝点（℃）		−3	0	—	—
含硫量（重量%）	不大于	1.7	2.7	2	4
机械杂质（重量%）	不大于	0.1	0.15	0.25	0.25
水分（体积%）	不大于	0.1	0.5	0.75	1.5
沥青质（重量%）	不大于	-	—	1	1
高热值（kJ/kg）		44589.4～44798.76	43961.4～44380.08	43124.04～43542.72	42705.36～43124.04

表 2.2.4-16

ISO 对船用重油的要求

质量指标	试验方法	极限	ISO-F-														
			RMA 10	RMB 10	RMC 10	RMD 15	RME 25	RMF 25	RMG 35	RMH 35	RMK 35	RML 35	RMH 45	RMK 45	RML 45	RMH 55	RML 55
密度，15℃（kg/m³）①	ISO 3675	最大	9750	991.0		991.0	991.0		991.0		—		991.0	—		991.0	—
运动粘度，100℃（mm²/s）	ISO 3104	最大	10.0			15.0	25.0		35.0				45.0			55.0	
闪点（℃）	ISO 2719	最小	60			60	60		60				60			60	
上倾点（℃） 冬季	ISO 3016	最大	0	24		30	30		30				30			30	
上倾点（℃） 夏季	ISO 3016	最大	6	24		30	30		30				30			30	
康氏残炭（重量%）	ISO 6615	最大	10		14	14	15	20	18	22		—	22		—	22	—
灰分（体积%）	ISO 6245	最大	0.10			0.10	0.10	0.15	0.15	0.20			0.20			0.20	
水分（体积%）	ISO 3733	最大	0.50			0.80	1.0		1.0				1.0			1.0	
硫分（重量%）		最大	3.5			4.0	5.0		5.0				5.0			5.0	
钒（mg/kg）		最大	150		300	350	200	500	300	600			600			600	

注：①表中的数值是每项质量指标的最大值或最小值。任何一批燃料的实际值允许在这些限值以内变动。

②买主应确定倾点适合于船上设备，尤其当船舶在北半球和南半球都航行时。

1.3 ISO 国际船用燃油标准

国际标准化组织（ISO）所订的国际船用燃料标准——“石油制品——（*F* 级）燃油——船用燃油规格”ISO 8217：1987（*E*）对船用重油的要求如表 2.2.4-16 所示。

本标准是国际标准化组织 ISO 会同船舶及石油工业制订的，在国际上第一次规定了船用柴油机和锅炉中使用的石油燃料的要求。

2 主要质量与性能指标

重油（燃料油）的主要质量与性能指标随原油的产地、炼制方法等的不同而异。表2.2.4-17所示为在不同港口加装粘度基本相同（180 mm²/s）的中间燃料油的主要质量与性能指标的对比。

表 2.2.4-17 **在不同港口加装 180 mm²/s 的中间燃料油的主要质量指标**

指标 \ 加油港口	中 东	远 东	北 非	委内瑞拉	美国西海岸	美国东海岸
密度，15℃（g/cm³）	0.9549	0.895	0.9237	0.9699	0.9896	0.9699
闪点（闭口）（℃）	98.89	—	96.11	85	82.22	82.22
凝点（℃）	7.2	49	35.0	−12.2	−9.44	−1.11
浊点（℃）	—	—	40.6	−11.11	—	—
雷氏 1 号粘度 100℃（s）	1830	1500	1500	1480	1500	17500
水分（%）	<0.1	—	0.08	0.1	0.1	0.2
灰分（%）	0.01	—	—	0.07	0.03	0.08
康氏残炭（%）	8.3	4.8	5.3	11.0	10.6	12.6
硫分（%）	3.8	0.12	0.5	2.4	2.2	1.3
钒（ppm）	44	<1	10	250	64	26
钠（ppm）	40	—	40	30	24	20
沥青（%）	2.3	—	3.5	70	8.2	3.6
低热值（kg/kg）	43264	—	43031	43066	42798	43008

由于重油（燃料油）是由残渣油调合而成的石油产品，价格低廉，控制质量指标较少。国外燃料油以粘度作为区分标号的代表指标，并以此论价。其它指标则不加以规定。

2.1 密度

原油的成分不同，炼得重油（燃料油）的密度也不同，表 2.2.4-18 所示是我国主要油田的原油所产渣油的密度。

表 2.2.4-18　　我国主要油田的原油所产渣油的密度

原油产地	大　庆	任　丘	胜　利	孤　岛
密度 ρ_{20}（g/cm³）	0.927～0.94	0.959	0.9797	0.9878

表 2.2.4-19 所示为国外一些重油（燃料油）的密度。

表 2.2.4-19　　国外重油（燃料油）的密度（g/cm³）

	中　东	北　非	委内瑞拉	美国东海岸	美国西海岸	远　东	北　海
320 mm²/s 以上密度	0.969	0.970	0.960	1.006	0.96		
180 mm²/s 密度	0.952	0.924	0.950	0.99	0.97	0.895	0.91

密度在使用中的作用如下：

1)装油时密度是计量的主要数据，需要按温度变化作修正，由于装油时需加温高于该种油品的可泵温度，这时就和 15℃或 20℃时的标准密度有差别。某种重油（燃料油）在 20℃时密度为 0.925 g/cm³，加温至 50℃，此密度为 $\rho_{50}=0.9250-0.00059\ (50-20)=0.9086$ g/cm³，两者密度相差 $\rho_{20}-\rho_{50}=0.9250-0.9086=0.0164$ g/cm³，如不修正要损失油 1.64%。石油密度的温度修正公式：

$$\rho_t=\rho_{20}-\gamma\ (t-20)$$

式中：ρ_t——油品在温度为 t（℃）时的密度，g/cm³；

γ——石油密度温度修正系数，g/cm³℃，见表 2.2.4-20。

表 2.2.4-20　　石油密度温度修正系数 γ

ρ_{20}	γ	ρ_{20}	γ
0.8064～0.8291	0.00071	0.9074～0.9382	0.00059
0.8292～0.8533	0.00068	0.9383～0.9729	0.00056
0.8534～0.8792	0.00065	0.9730～1.0131	0.00053
0.8793～0.9073	0.00062		

2)按密度选择预处理的方法和调节环（比重环）：

（1）分油等预处理方法的选用参阅表 2.2.4-21。

表 2.2.4-21　　预处理方法与密度的关系

密度（g/cm³）	预处理方法
小于 0.991	分油机允许的最高分离的密度
小于 1.050	加 $MgSO_4$ 到分油机水封水中去提高水的密度，水和油的密度差增大才能分油
小于 1.010	ALCAP 新型分油机
大于 1.050	只能采取匀质器进行预处理

（2）根据油品的密度按分油机说明书图表选用适当的调节环（比重环）进行分油。请参阅本手册辅机中分油机部分。

3)对喷油量的影响：

在同样的油门开度（齿条格数）下，即喷油泵柱塞的有效行程相同时，喷射出的重油（燃料油）质量较同样体积的柴油大，虽然重油（燃料油）的热值较低，但重油（燃料油）总的发热量要比重柴油为大。

由于密度与低热值的不同，使每单位体积燃油含有的低热值不同，如表 2.2.4-22 所示。

表 2.2.4-22 三种燃油的单位体积的低热值

项目 / 油品	密度 $\rho_{15°C}$ (g/cm³)	低热值 Hu (kJ/kg)	单位体积燃油含有的低热值 (kJ/cm³)
船用柴油（MDO）	0.853	42509	36.26
中间燃料油 MFO，180 mm²/s	0.958	40585	38.88
中间燃料油 MFO，280 mm²/s	0.975	40166	39.16

由表可见单位体积燃油含有的低热值为 $MDO<MFO$ (180 mm²/s) $<MFO$ (280 mm²/s)。因此，当喷油泵的喷油量相同时，使用粘度较大的中间燃料油（MFO）将使发动机具有较高的转速和功率。

2.2 粘度

国际上对重油(燃料油)常用粘度作为区分燃油规格及收取费用的指标，现已统一用 50℃时的运动粘度(mm²/s)的值作为表达单位，它与过去惯用的条件粘度的关系，见表 2.2.4-23。

1)温度对粘度的影响

控制温度变化可改变油品的粘度。在同一油品中，粘度随温度升高而下降，在不同的油品中，粘度随温度而变的变化是不相同的，如含胶质多的裂化燃料油不仅比含蜡量大的直馏燃油粘度大，而且前者当预热超过凝点温度时，其流动性仍差，粘度也大，而后者当加热超过凝点时，则粘度显著下降。此外，表示某种油品的粘度时必须注明温度条件。

图 2.2.4-1、2.2.4-2 表示国内外燃油的粘温特性。燃料油粘度很高，必须加温降低粘度

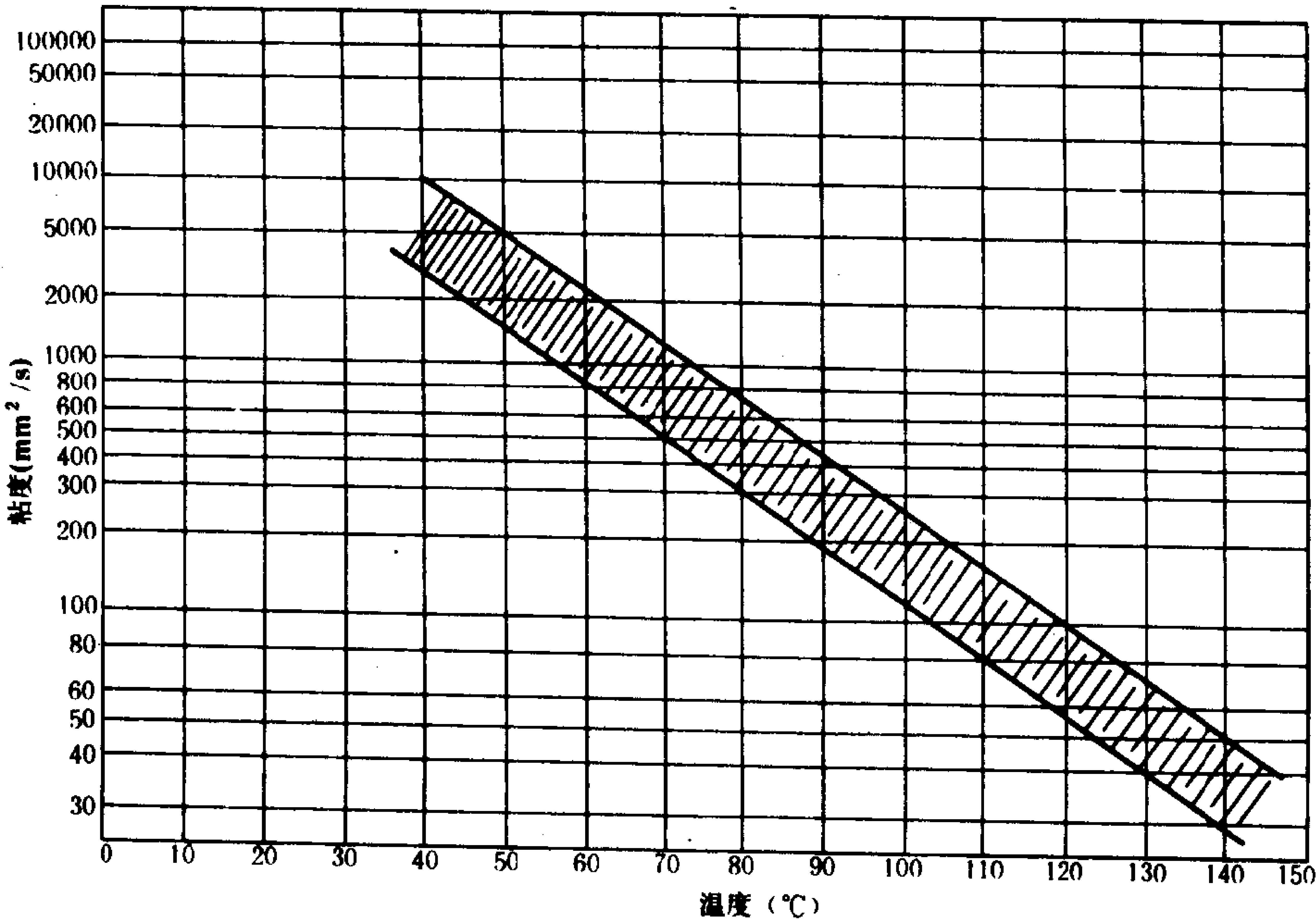


图 2.2.4-1 国产渣油粘温曲线变化范围（实测值）

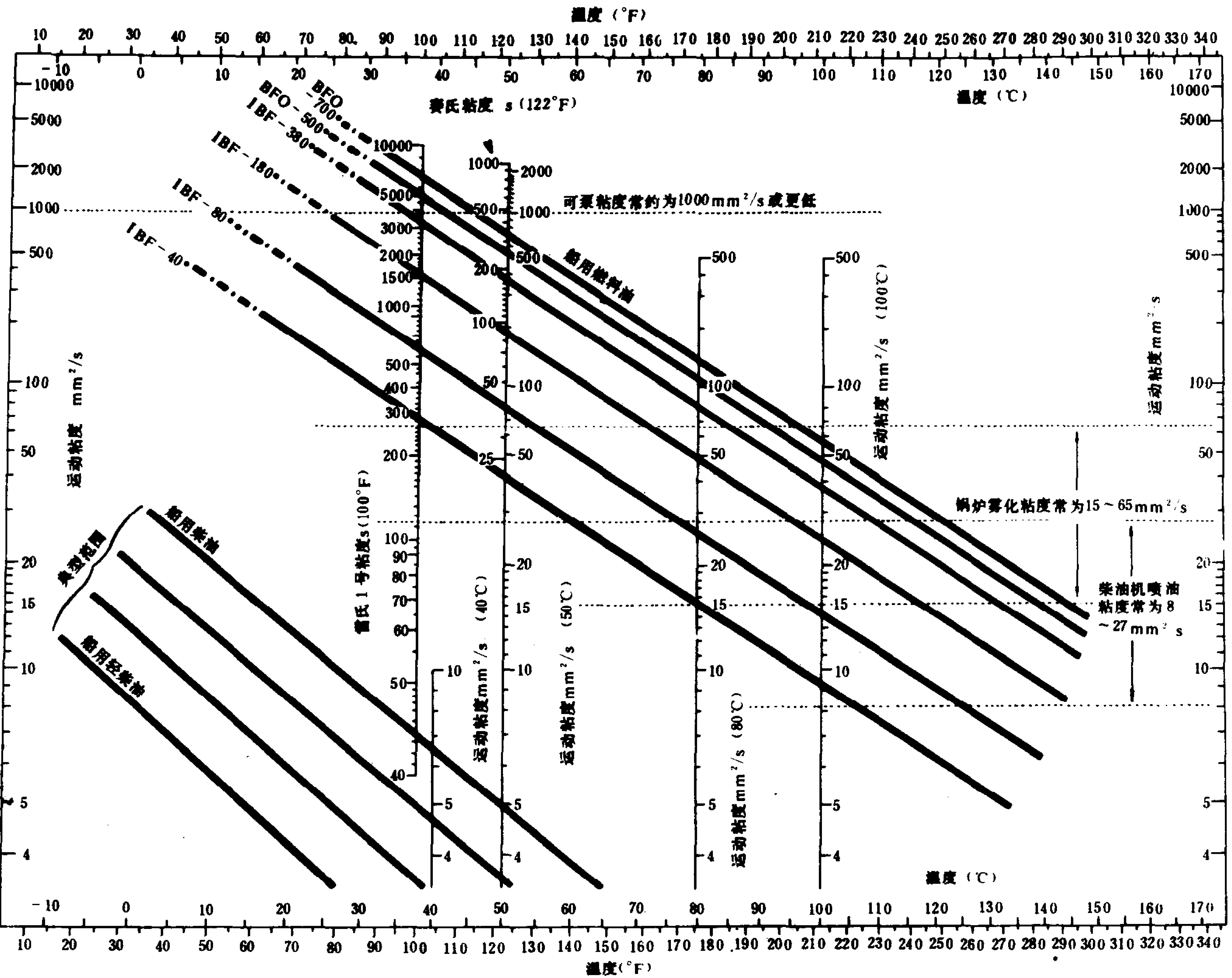


图 2.2.4-2 典型船用燃油粘温图

以达到贮存、驳运、混和、分油、雾化时需要的粘度值，可在粘温曲线图上查得相应的加热温度。

2)压力对粘度的影响

(1)一般重油，压力增大时，粘度增大。图 2.2.4-3 所示为粘度随压力而变的曲线。

表 2.2.4-23 运动粘度与条件粘度的关系

运动粘度 50℃ (mm²/s)	雷氏一号粘度 37.8℃ (s)	恩氏粘度 50℃ (°E)	赛氏-弗氏粘度 50℃ (s)
30	200	4.1	
40	280	5.3	
60	440	7.9	31
80	610	10.5	40
100	780	13.2	49
120	950	15.8	58
130	1050	17.1	62
150	1250	19.8	72
180	1500	23.7	85
240	2200	31.6	114
280	2500	36.9	132
320	2900	42.1	151
380	3600	50.0	179
420	4100	55.0	199
460	4600	61.0	217
500			236
700			330

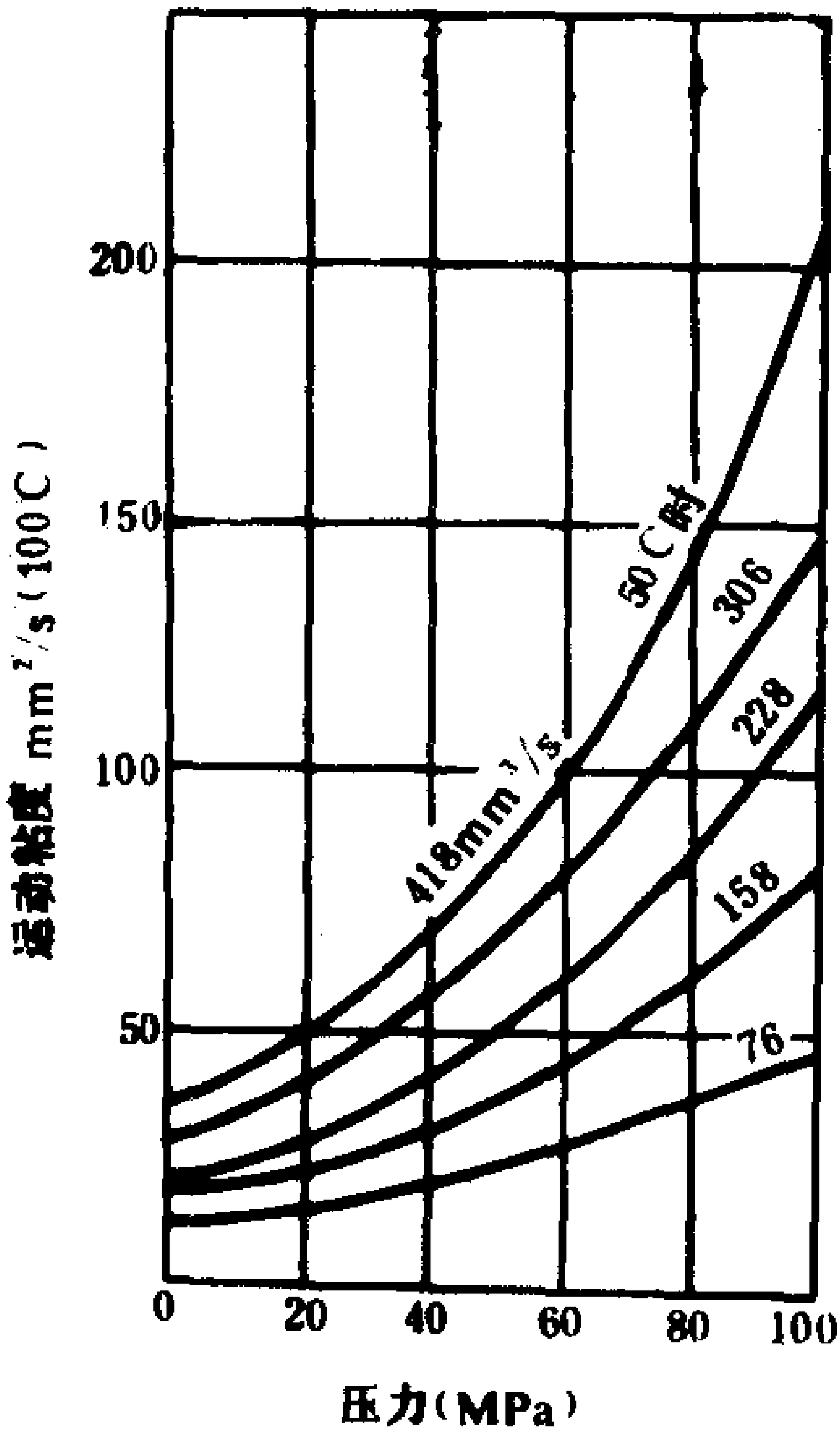


图 2.2.4-3 粘度-压力曲线

表 2.2.4-24

燃油粘度与分油机流量及分油加热温度的关系

粘	度	分油机流量为额定分油量的百分比 (%)	分油加热温度 (℃)
运动粘度, 50℃ (mm²/s)	雷氏一号粘度, 100°F (s)	60	80~98
不大于 40	280	40	80~98
不大于 80	600	30	90~98
不大于 180	1500	25	98
不大于 380	3500	20	98
不大于 460	4500	15	98
不大于 600	6000		

在高压喷油泵中，喷射的燃油需要考虑压力对粘度的影响。当温度、压力同时变化时，渣油的粘度、压力、温度之间关系可用图 2.2.4-4 求出。例如：要求喷油粘度为 2.5°E，喷油压力为 50 MPa，可在图上确定 A、B 两点，作 BC 线平行于粘度-压力线，作 CD 线平行于横坐标并与各粘度-温度线相交，交点分别是 E、F 等。根据 E、F 点即可确定各种粘度不同的燃料油所需的加热温度，如雷氏一号粘度为 1000 s 的燃料油（E 点）的加热温度应为 113℃，而 2000 s 的燃料油（F 点）的加热温度则为 126℃。

（2）同一油品，当温度升高时，压力对粘度影响减少，反之增大。

用分油机分油时，加热温度与流量应根据油的粘度来确定。如表 2.2.4-24 所示。

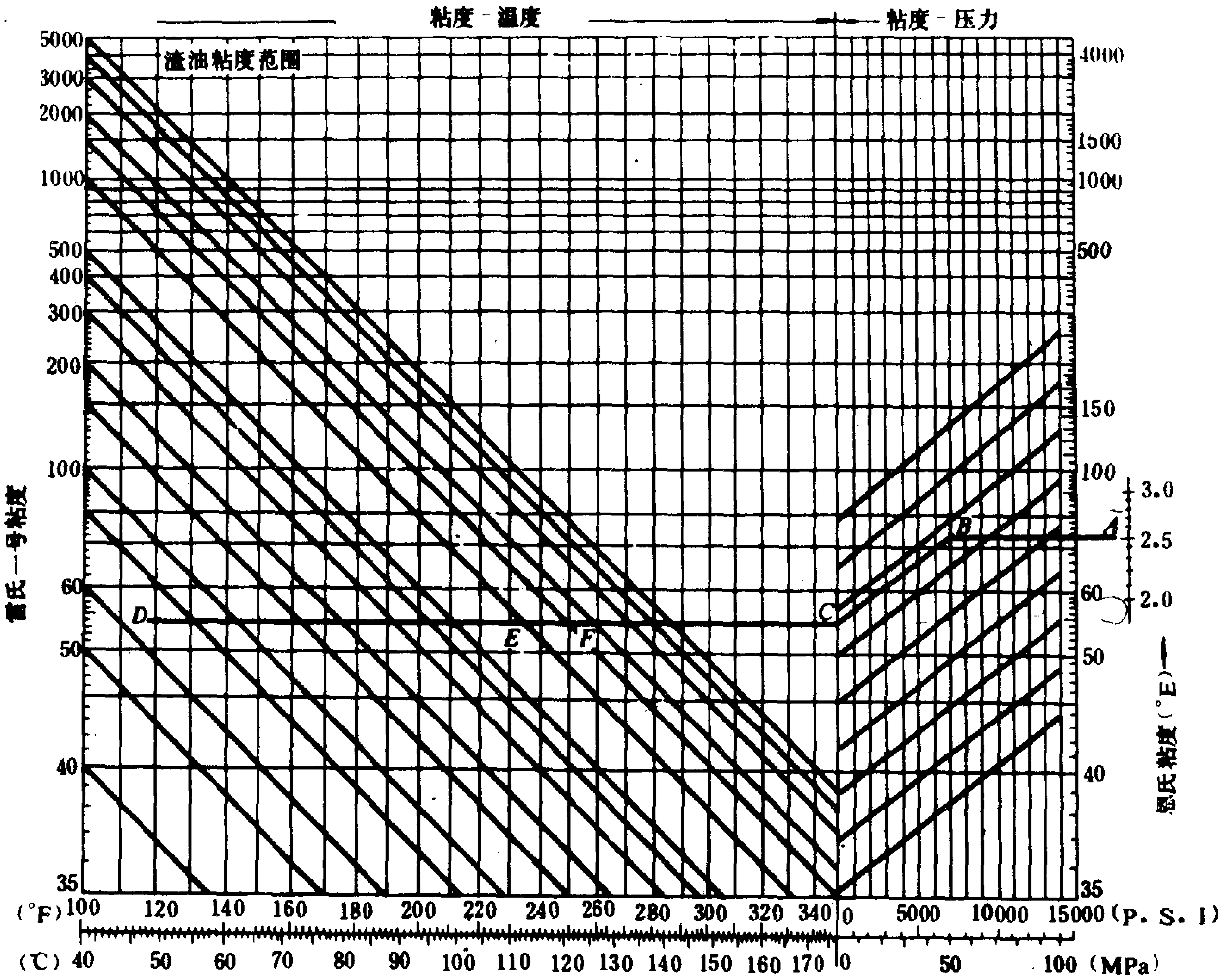


图 2.2.4-4 粘度-温度压力曲线

分油粘度处于 46～245 s（雷氏一号粘度）时，分离效果较好；粘度越小，分离机械杂质和水分的效果越好。国产 250 号重油（渣油）在最高许用分油温度 98℃时，相应的粘度大大地超过了 245 s（雷氏一号粘度），因此，国产渣油几乎是无法进行分油的。

在进柴油机前或锅炉前达到最佳雾化粘度可以获得较好的喷油雾化效果，这是确保燃油燃烧良好的必要条件之一。各种柴油机制造厂在发动机说明书中都规定了该种发动机的最佳雾化粘度。

2.3 凝点（倾点）

凝点（倾点）决定某些油品的加热温度及贮运性能，是用管道运输或装卸油料可行性的指标。

油料的凝点取决于它的成分和组成结构。大分子结构的烷烃和芳香烃凝点较高，环烷烃和烯烃的凝点较低。在同一烃族中，凝点随分子量的增大而升高。重油（燃料油）是重馏分组分与残渣油组成富集了大分子的物质，故其凝点是较高的。

油料因低温失去流动性有两种情况：

1）对于含蜡较多的油料，温度降低时，蜡先析出结晶，进而晶体增大形成网状的品架，使凝点较低的组分吸附在网眼之中，从而使整个液体失去流动性，称为结构凝固。

2）对于不含或少含蜡的油品，当温度降低时，油料本身粘度增大而失去流动性，称为粘温凝固。含蜡的油料，其凝固温度一般高于不含石蜡的油料。

根据凝点（倾点）的不同，在贮存中要注意下列各点：

（1）在贮存中要及时加热保温。当重油凝点低于环境温度时，油品即要凝固。因此，凝点（倾点）较高的油品特别要注意贮存中的加热保温。加热保温的温度至少要高于该油品倾点 5℃以上，才能保持其可泵性。

（2）保温的温度不宜太高，以免加速燃油的蒸发、老化及相应地产生一些其它问题。同时，加热温度太高，还要消耗更多的蒸汽。目前新型低速柴油机的热效率很高，废气温度较低，从废气锅炉中所得到蒸汽量较少，若用烧燃油锅炉产生蒸汽来满足重油加热是不经济的。

2.4 残炭

根据重油（燃料油）残炭值的大小可以判断油品含胶质、沥青质、多环及稠环芳香烃等燃烧性不佳的组分的多少。因此，残炭值是表明燃烧性能好坏的指标之一。燃用残炭值较大的燃料油时，燃烧室积炭较快，会缩短柴油机的维修保养周期。

残炭值中包括了机械杂质和灰分。重油（燃料油）主要是由重馏分油和残渣油组成；含有较多的沥青质、胶质、多环、稠环芳香烃，硫、氮、氧化合物、机械杂质和灰分以及高沸点组分，因此重油（燃料油）中的残炭值必然是很高的。国产重油（燃料油）的残炭值一般小于 10。国外重油（燃料油）的残炭值一般也为 10 左右，但有些劣质燃油的残炭值会超过 20。不过，一些值已被MAN－B&W、SULZER、PC等低、中速、大型柴油机制造厂所接受，作为允许使用劣质燃油的极限值之一。

由于重油（燃料油）中残炭值在 10 以上，因此，使用重油（燃料油）时，应采取措施以减少炭垢的生成：

（1）认真进行预热处理，尽量净化燃油。

（2）要选用合适的气缸油。

（3）改善燃油喷射系统，提高燃油的雾化与燃烧性能。

（4）及时地冲洗增压器的空气和废气通流部分，以得到较高的扫气压力，确保完全燃烧。

（5）使用燃油添加剂。

2.5 灰分

灰分来源于：

（1）原油中含有的金属有机化合物，在蒸馏过程中不易蒸馏出来，大部分浓集到残渣油中，燃烧后生成金属氧化物或金属盐。因此重油（燃料油）中的灰分较多。

（2）重油中的机械杂质（包括混入的氧化铁、金属盐等或加工过程中混入的氧化物金属盐）净化后仍未能除去、灼烧后不能挥发的部分，形成灰分。

（3）在加工过程中进入油品的催化剂、氧化物与金属盐。

灰分过多带来的问题是：

（1）灰分沉积在锅炉受热面上，使传热效率下降。

（2）增加积炭硬度，从而使柴油机气缸套和活塞环的磨损增加。

（3）使柴油机燃烧系统、排气系统的沉积物增加。

解决灰分过多的对策是：

（1）搞好燃料油品的过滤与净化，用分离法除去机械杂质，以减少燃烧时灰分的形成。

（2）使用合适的气缸油。

2.6 机械杂质

重油（燃料油）中的机械杂质除来自贮运、使用及加工过程中进入油品中的非油溶性固体物质外，还有在加工过程中残余的添加剂。国产重油（燃料油）的机械杂质出厂允许值在3％以下。在贮运过程中要防止机械杂质再度进入油品，否则会使油品超过出厂时合格的标准。

机械杂质的危害性是：

（1）增加燃油系统及柴油机的磨损。

（2）堵塞滤器。

（3）使灰分增加。

除去机械杂质的对策是：

1)过滤：按一定的要求设置滤网，加强过滤，如表2.2.4-25所示。

表2.2.4-25　**重油对各部位设置滤网的要求**

部　　位	主　　机	辅　　机
输送泵入口	20目滤网	20～24目滤网
分油机入口	32～60目滤网	24～60目滤网
升压泵入口	60目滤网	—
发动机入口	150目滤网	200目滤网

2)分油：一般非油溶性固体杂质在正确的分油参数下，可以分离出去。

3)沉淀：由于重油粘度较大，机械质量沉淀较缓慢，适当提高其温度，降低粘度，加快其沉淀速度。

2.7 水分

重油中的水分来自于：

（1）在贮运中进入油品的水。

（2）石油产品有一定程度的吸水性，可从大气中或与水接触时，吸收和溶解一部分水。

（3）在使用中，由于舱柜、管道泄漏或操作不当等原因，使水进入油中。

水分的危害性是：

（1）重油（燃料油）密度及粘度大，可混入较多的水分而不易析出，甚至超过规定值较多，造成较多的热值损失。

（2）如混入海水，海水中的钠与重油中的钒结合导致高温腐蚀。

（3）水分存在于重油（燃料油）之中，易导致通大气的油柜（如混合油柜、日用油柜及通大气的集油井），在加温较高时产生泡沫。严重时会影响对主机的正常供油。

（4）使用重油（燃料油）时，要加热到一定的温度。当油中含有水分时，气化与气蚀的可能性会增加，轻者会使发动机转速不稳定，重者会导致发动机停车。

（5）水分和重油（燃料油）中的沥青烯结合，使燃烧困难，滞燃期增大，发动机热负荷增大。

水在油品中存在的状态有三种：

（1）悬浮状：水分以水滴形状悬浮于油中。这种状态多产生于粘度较大的重油中。

（2）乳化状：水分以极为细小的水滴状均匀地分散于油中而形成乳浊液。水滴微粒很细，使重油与水分密度相差很小，所以水分在油中难以分离。

（3）溶解状：水分以溶解在油中的状态存在，通常烷烃、环烷烃及烯烃溶解于水的能力较弱。芳香烃能溶解较多的水分，而重油（燃料油）中含芳香烃的数量较多，所以重油（燃料油）可能含有的溶解状水分也较多。

对水分的对策是：

（1）在舰船贮存与使用中杜绝外界水分进入。

（2）对已进入油品中的水分，应采取下列措施：

①加热沉淀分离出水分，并要及时放水。这是分油机分离前的预处理。加热温度尽可能高，但要低于该油的闭口闪点。

②用分油机分出水分。

③由于重油（燃料油）的密度大，粘性大，含杂质多，因此含水分较多时会产生强烈的乳化作用，加热沉淀与分油机分离也难以把水分分离出来。应用抗乳化添加剂，消除乳化现象，使水分容易分离出来。

2.8 钒和钠

钒以金属有机化合物的形式存在于原油之中。这些金属有机物是油溶性的化合物，溶于油中，净化系统无法除去。在炼制过程中也不蒸发，因而大部分浓集到残渣油中，燃烧后大部分形成金属氧化物。

钠是原油中含有的有害金属元素，其来源也可能是由于海水漏入油料中的结果。

钒和钠在油品燃烧后都会形成灰分，导致高温腐蚀的发生。高温腐蚀的机理如下：

灰分中存在氧化物，无机盐或低共熔混合物，而钒和钠所形成的一些化合物及其混合物

的熔点是相当低的。如表 2.2.4-26 所示。

表 2.2.4-26　　　　一些氧化物、无机盐、共熔混合物的熔点

物质名称	熔点（℃）	物质名称	熔点软化点（℃）
$CaSO_4$	1450	$Na_2O \cdot V_2O_5$	630
Fe_2O_3	1560	$2(Na_2O \cdot V_2O_5)$	640
NiO	2090	$2Na_2O \cdot V_2O_5$	600
SiO_2	1720	$V_2O_5 \cdot Na_2SO_4$	550—580
Na_2SO_4	880	$5Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 11V_2O$	535
V_2O_4	1970	60% Na_2SO_4+40%V_2O_5	300
V_2O_5	675		

其中尤其是V_2O_5与Na_2SO_4形成的低共熔混合物，在近似于二者组成各为 60%与 40%时，熔点（软化点）为最低，此时钠与钒的重量比约 1 ：3，见图 2.2.4-5。铁在高温度下被氧化后，表面上生成一层Fe_2O_3或Fe_3O_4的氧化膜，可保护基体金属不再继续氧化腐蚀。附着的熔化的钒钠化合物和氧化膜作用后，破坏了铁的保护膜，使金属继续裸露而不断腐蚀。这种腐蚀是往纵深方向发展的，形成腐蚀凹坑。温度越高，腐蚀越严重。该类腐蚀称为高温腐蚀，也称为钒腐蚀。柴油机中温度较高的部件，如排气阀与排气阀座，易受钒腐蚀而产生腐蚀凹坑，而形成的脆硬物质在气阀冲击运动下会崩碎脱落。这些都使排气阀与阀座配合不良、关闭不严而漏气，并使排气阀很快被烧坏。又如柴油机增压器废气涡轮的喷嘴温度也较高，若温度超过钒钠化合物的熔点，也同样会发生类似的高温腐蚀。其它燃烧室组成部件也会产生高温腐蚀。

防止高温腐蚀的措施是：

（1）如果常用含钒高的燃油，设计柴油机燃油系统时，就要选择合适容量的分油机，加大沉淀油柜和日用油柜的容量。

（2）正确进行分油与沉淀的操作，确保油水分离，以获得良好的效果。尽可能除去含有钠化合物的水分。控制钠含量低于 1/3 钒含量，使之不形成低共熔混合物。

（3）注意排气阀及阀座冷却是否正常。

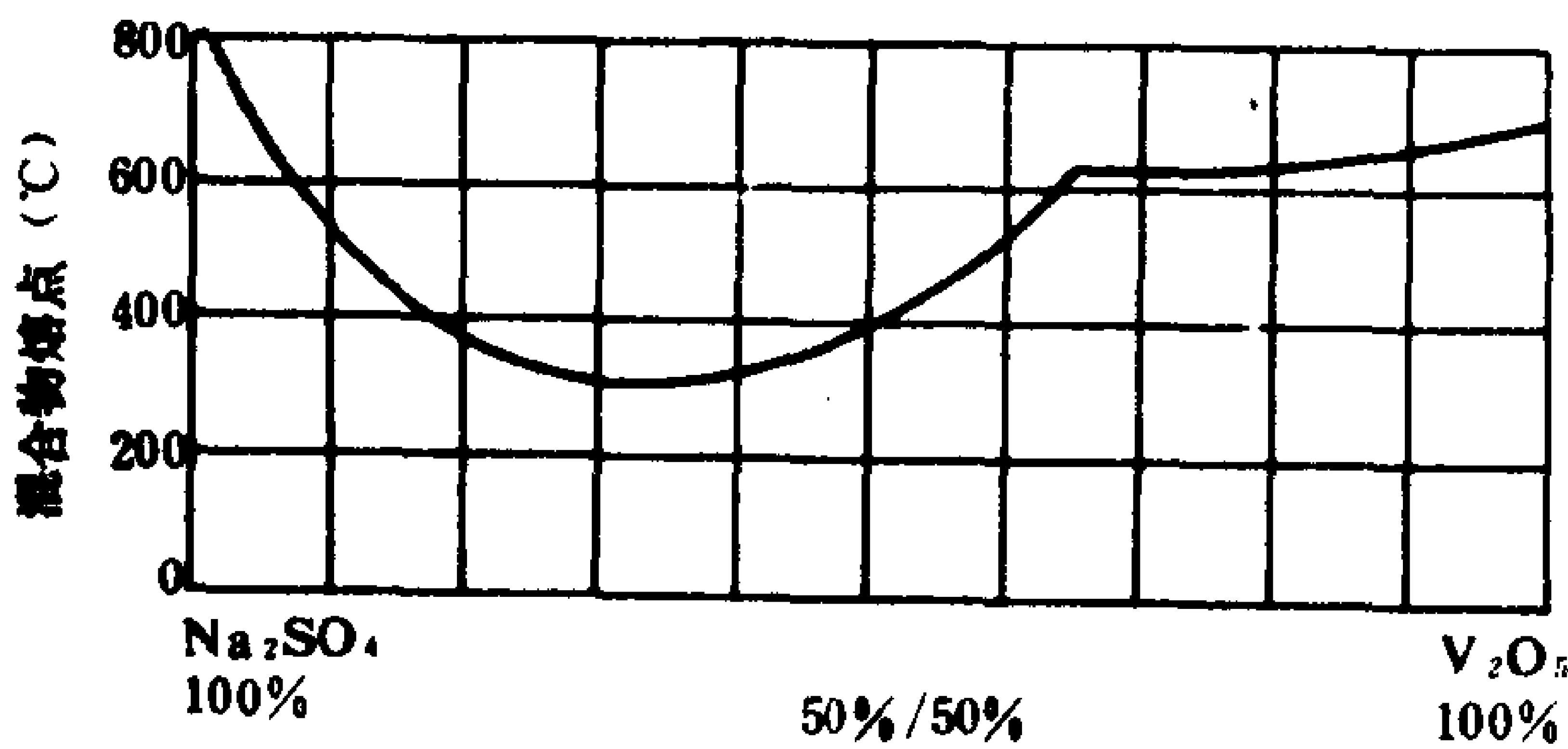


图 2.2.4-5　不同比例的Na_2SO_4与V_2O_5混合物的熔点

（4）适当控制燃烧室中受到高温部件的温度。

（5）使用防腐蚀型燃烧促进剂及油水分离型添加剂。

（6）必要时可降低主机输出功率，来控制燃烧室与排气阀的温度。

2.9　硫分

重油（燃料油）中的硫分来源于原油中的含硫量。国内外原油的含硫量如表 2.2.4-27 所示。

表 2.2.4-27　　国内外原油的含硫量

	产地	大庆	胜利	孤岛	玉门	克拉玛依
国内	含硫量（%）	0.11	0.6~1.1	2.03	0.11~0.18	0.04
	产地	四川				
	含硫量(%)	0.04				
国外	产地	中东	北非	委内瑞拉	北海	英国
	含硫量(%)	1.4~4	0.2	2.5~5.5	0.5	0.36
	产地	阿拉斯加	美国北坡	墨西哥	印尼	苏联秋明
	含硫量（%）	1.5	1.04	1.56	0.08~0.68	0.97

国内的大多数原油属低硫石油，因而生产出的重油（燃料油）含硫也低。

油品中，硫化物多数留在重馏分及残渣油之中，因此重油（燃料油）含有较多的硫分。

硫分与提炼的深度有关，残渣油产量占原油的百分比越少，则其含硫量越大。

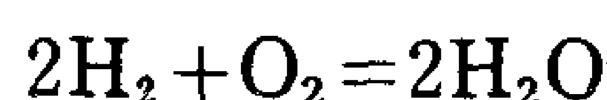
硫分的危害性主要表现在两个方面：

1)硫的腐蚀性

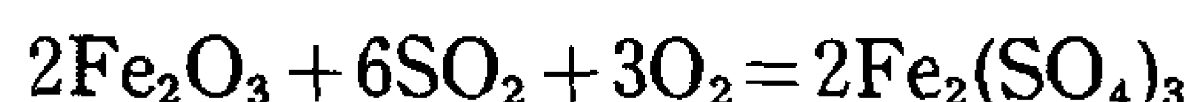
由于燃油中存在硫、钒、铁、氢等元素，在燃烧时产生各种氧化物，其化学反应式如下：



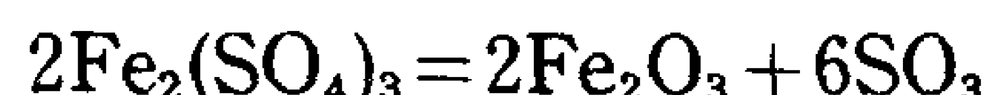
$$S+O_2=SO_2$$



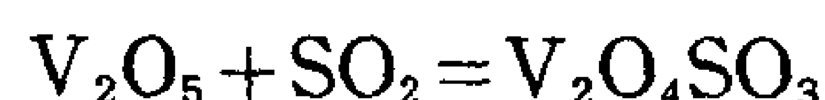
$$2H_2+O_2=2H_2O$$



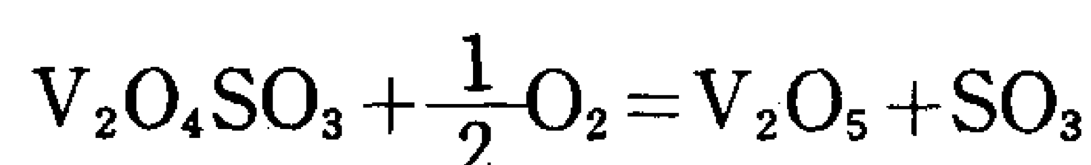
$$2Fe_2O_3+6SO_2+3O_2=2Fe_2(SO_4)_3$$



$$2Fe_2(SO_4)_3=2Fe_2O_3+6SO_3$$



$$V_2O_5+SO_2=V_2O_4SO_3$$



$$V_2O_4SO_3+\frac{1}{2}O_2=V_2O_5+SO_3$$

其中V_2O_5和Fe_2O_3是促使SO_2转变为SO_3的催化剂(见反应式)。形成的SO_2和SO_3大部分随废气排离气缸，余下的SO_3会和缸壁上气缸油膜起反应，当气缸温度低于露点时，SO_3会和水反应生成硫酸，产生腐蚀磨损。腐蚀磨损主要存在于气缸套，并对喷油器、增压器壳体产生腐蚀。排气阀也会受到冷腐蚀的影响，这是由于在阀杆温度最低处生成的硫酸而引起的，一般发生在阀杆进入冷导套处附近，这种腐蚀是点腐蚀，但会发展到全部损坏。

2)硫分使发动机的积炭硬度增大，这加大了气缸套与活塞环的磨损。

防止硫分危害性的对策如下：

(1)十字头柴油机用碱性气缸油。中速筒状活塞柴油机用有合适碱值的柴油机油。这类滑油中的碱性添加剂能有效地中和凝结的硫酸，防止腐蚀磨损。如何选择合适的润滑油，请参阅本卷第3篇的有关章节。

(2)提高柴油机冷却水的温度至规定范围的上限,使柴油机与SO_3接触有关部件，其温度在形成硫酸的露点以上。试验表明，当金属表面温度低于露点30～35℃时，硫酸凝结量最大，铁腐蚀量也最大。因此，要使有关部件的表面温度避开露点以下20～40℃的温度区域。冷却水温度也不能过高，否则会使气缸油失去润滑作用。要适当控制扫气温度，过低的扫气温度会降低排气温度，促使柴油机有关部件的温度低于露点，受到硫酸的腐蚀。

(3)除去燃油中的水分（特别是海水），定时放泄扫气空气中的水分。

(4)改用抗腐蚀性与耐磨性好的材料制造缸套和活塞环。

2.10 铝与硅

在炼制石油产品的催化裂化过程中，所用的催化剂一般是含有氧化铝和氧化硅的人造硅酸或天然白土，有部分催化剂在提炼过程中，残留在残渣油中未被清除，使重油（燃料油）中含有铝和硅。催化剂本身是硅酸铝，表面积很大。催化剂的微粒大小为 1 ～160 μm，但大多数为 50～60 μm。催化剂在不断流动中，将分裂出 1 ～10 μm的更小粒子，而其中 3 ～ 8 μm的粒子无法过滤除去，产生了下列破坏作用：

（1）3 ～ 8 μm的粒子可进入喷油泵与喷油嘴偶件的间隙而导致偶件的不正常磨损。

（2）催化剂粒子燃烧后大部分随废气排走，剩下灰分进入滑油，形成糊状物质。它是非常坚硬的磨料，使缸套及活塞环产生异常磨损。

目前除去铝与硅微粒的最有效的方法是正确操作离心分油机。将重油（燃料油）的分油温度提高到 95℃，并使分油流量低于 15%的额定流量进行分油，这样可以除去 70%～81%的最重颗粒。目前大多数生产四冲程或二冲程发动机的制造厂都可以接受含有 30 ppm催化剂的燃油。如经正确地分油后，重油中催化剂的含量可以低于此值。因此在使用中不会产生十分显著的危害作用。

2.11 胶质和沥青质

胶质和沥青质是石油中的主要氧化物。胶质和沥青质的含量越高，石油的颜色越深，密度越大。石油中的大部分氧、硫、氮及金属元素铁、镁、钒、镍等都可以存在于胶质、沥青质中。胶质在天然石油中含量为4%～20%左右，在较重的高胶质石油中含量可达20%～50%。胶质的分子量很大，平均为 600～1000。胶质中含有 80%～85%的碳，9 %～10%的氢，0.5%～2.5%的硫，4 %～10%的氧和少量的氮。胶质几乎没有挥发性，沸点较高，在石油的提炼中大部分留在重质油中。胶质易溶于苯等溶剂及石油的馏分中。胶质对热是极不稳定的，很容易发生分解或叠合作用。特别是高硫原油中的胶质在常压、减压蒸馏中就可能发生化学变化，如：在 230～360℃左右就有一部分会转化成为沥青。尤其在氧气中，不论温度的高低，长期受氧化或浓缩作用，必然会转变成为沥青状的物质，甚至进一步产生出不溶于油的焦炭状物质。沥青质比胶质分子更大，分子量可达几千，它是含有氧、硫的芳香烃化合物，其性质类似胶质，但化学性质比胶质稳定，在加热到 400℃以上时，才能分解成低分子烃类和焦炭(炭青质)。沥青质相对密度大于 1，不溶于酒精和汽油，但溶于苯、氯仿和二硫化碳等溶剂。沥青质主要残留在蒸馏残渣油中，一般原油中含沥青质为百分之零点几到百分之几。沥青质的组成大体是 85%～87% 的碳，6 %～7.5% 的氢，6 %～ 8 % 的氧，0.5%～ 1 %的硫。

胶质与沥青质的不良影响如下：

（1）沥青质含量过多时会影响重油（燃料油）的混溶稳定性、热稳定性及贮藏稳定性，产生沥青质凝聚型油。该油除了沉积在油柜底部或滤网上外，还渐渐粘附在燃油泵和喷油嘴的偶件与阀件上，可能会使它们咬死。

（2）沥青及胶质含有不易燃烧成分，导致滞燃期变长、燃烧不良、产生后燃等，从而使柴油机热负荷增大，排温升高，耗油率增加。

（3）使用中形成硬的沉积胶膜和大量积炭。增加机械磨损和降低机械效率。

（4）加热温度过高时，沥青质会在加热面上沉积出来。

2.12 稳定性

1)重油的胶体结构

重油中含有较多沥青质，它不溶于正庚烷而溶于苯。在原油或重油中，沥青质的胶粒结构的形式作为分散相，分散在石油介质中，石油介质是连续相的分散介质，沥青胶粒由一个C/H非常高的沥青核组成。沥青质的亲和性按芳香烃——环烷烃——烷烃的顺序递减。C/H的大小顺序同样也是以芳香烃——环烷烃——烷烃的顺序减少的。根据亲和性的大小，沥青质从周围的石油介质中吸附一层比沥青本身C/H稍低一点的物质（如高分子量的胶质、多核芳香烃)，接着其表面上又吸附一层C/H更低物质，如此连续一层一层地形成了胶质微粒，胶质微粒的最外层的C/H又接近于石油介质的C/H，因而使沥青胶粒悬浮在石油介质中。由于以沥青质为核的胶粒到油质介质之间的一层层吸附物处于吸附平衡状态，因而形成了比较稳定的均匀相与胶体离子的油相溶液。当这种平衡能保持时，重油具有一定的稳定性。

2)重油的稳定性

在稳定的重油中，沥青质处于胶溶状态，沥青核与石油介质之间，处于吸附的平衡状态。当某些因素作用于重油时，这种平衡状态被破坏，部分沥青质与其所包围的高C/H比的石油介质分离而互相凝聚成大块沥青质团，生成油泥沉淀物，使重油稳定性遭到了破坏。稳定性较好的重油，其沥青胶粒与石油介质的吸附平衡体系的性质，允许稀释或加热到一定限度而仍不破坏吸附平衡，不产生油泥沉淀，这种允许的限度称“稳定性贮备”。稳定性贮备较差的重油，只要外界条件有微小的变化，就会使吸付平衡破坏而变得不稳定，产生大量沉渣。在实际使用中，为了满足混容、加热与贮存等实际需要，重油应具有一定的“稳定性贮备”。“稳定性贮备”主要取决于所含沥青质的多少与石油介质的成分。如石油介质中含有C/H高的物质较多时（如环烷基原油），可容纳较多的沥青胶粒；而含C/H较低的石油介质（如石蜡基原油）中，则只能允许容纳较少的沥青胶粒。重油稳定性的变化，主要表现在混容稳定性、热稳定性和贮存稳定性三个方面。

（1)混容稳定性（相溶性）

当在大量重油中混入部分C/H较高的馏分油，或两种已掺调好且本身又稳定的重油混合在一起时，不析出或只是极少量地析出沥青，即基本上无油泥沉淀物产生，则称为两种油具有混容稳定性(相溶性)。混溶稳定性取决于沥青核与石油介质之间的吸附平衡。当石油介质的C/H减少时，沥青胶粒的C/H与其相邻的石油介质的C/H的差异增大，使胶溶状态的沥青吸附失去了平衡，造成沥青质的离析与产生油泥沉淀物。因此，要避免两种C/H相差过大的



图 2.2.4-6　试验燃油混合相溶性的标准油滴图

油品混合在一起，在用渣油调制重油（燃料油）时，应特别注意这一点。要选择适当组分，使调出的重油具有较好的混容稳定性。有时虽然两种掺调用的油品都是稳定的，但混合在一起时却可能产生油泥沉淀。混容的稳定性，可用简单的方法来试验：将两种燃油混合后均匀加温至 60～63℃ 左右或不加温，然后将油滴到滤纸上，在室温下让油滴扩散并与图 2.2.4-6 所示的标准比较。图中a）为完全相容，b）为非常不相容。当实际油滴的结果比b）所示的情况更坏时，表明其混容稳定性差。使用时将会导致分油机超负荷运转，燃油在发动机内燃烧会产生较多的结炭等不良情况。

（2）热稳定性

重油加温时，被沥青核吸附的分子动能增大而脱离开来，沥青胶粒的吸附平衡受破坏后，析出一部分沥青和产生油泥沉淀。加温后的重油粘度减少，加速了油泥的析出。长时间加温，会促使重油氧化变质，增加胶质和沥青或碳化物，甚至再生成游离碳和固体碳等更难溶的沉淀物。但沥青分解要较高的温度，一般只能产生在电加热表面上。因此，重油在预热时，以用蒸汽为宜；在凝点和粘度允许范围内，尽量控制预热温度，不要过高；加热时间不要过长，采用分段预热等以防重油变质。

（3）贮存稳定性

重油在贮存中，析出油泥沉积物的多少，是衡量贮存稳定性的指标。重油在贮藏中，较长时间受温度（保温、预热等）、重力、氧化等作用，一般很容易发生沥青质胶粒和石油介质吸附平衡破坏的现象，逐渐形成油泥沉积物。为保证在贮存过程中所生成的油泥沉积物不超过一定的限度，对较长期贮藏的重油，要求具有一定的“稳定性贮备”。

3）重油的析蜡

重油沉积物中含有蜡，这是重油中蜡析出的结果。蜡在低温时析出，只要升高温度则可全部重新溶解。蜡析出的温度，主要取决于蜡在重油中的溶解度而不是蜡的熔点。蜡的析出易引起滤器堵塞。当蜡的结晶很小且少时，对流动性影响不大；而当晶粒聚集成团和量大时，将填塞滤器。其结晶的大小，在一定范围可加以控制。结晶的大小及其形状除与蜡本身的性质有关外，可根据下列各方面加以控制。

（1）控制冷却速率，不使重油产生较大的析蜡结晶。

（2）对重油要连续加热。温度忽高忽低循环变化比连续加热更易形成较大的蜡晶体。如加热不充分还留下部分石蜡微晶，则在停止加热后，将以微晶为晶核继续生长，使结晶变得更大。这是贮藏中的重油，发生凝点（倾点）升高、流动性变差的原因。

（3）在整个重质燃油系统中，应尽量保持温度一致。如果仅有部分加热时，则在不加热的低温部分，蜡易聚集形成较大的结晶体。

（4）及时检查与清洁重油油柜中的淤渣，以免存在淤渣中的蜡的小晶粒成为晶核，使质量较好的新加入的重油生成较大的蜡晶体。

4）重油（燃料油）不稳定性的对策

（1）轻质油与重质油或不同的重油（燃料油）之间尽量避免或减少其相互混合。

（2）在燃油中加消散处理剂，以保持沥青质呈悬浮体，使之不作油渣排出。

（3）减少分油机的流量；提高分油温度（95～98℃）；增多排渣次数。使分油机尽可能有效地工作，以确保分离出较大的沥青质粒子与水分。

（4）减少重油的贮存时间。

（5）不能用加入轻质油来“稀释”重油的方法，否则会增加不稳定性，产生更多沉渣。

2.13 闪点

闪点是油品贮运使用有关安全的指标，国内外船舶建造规范规定船舶使用的燃油闪点不得低于60℃。

重油粘度大。为了使燃油中水分和杂质能有效地沉淀、分离，在沉淀柜、分油机处加温较高。日用柜的油温也较高。如果使用闪点过低的油种，将会有大量油气从沉淀油柜与日用油柜的透气管逸出。

在大气压力下，燃油加热的安全温度应低于闪点10～20℃。如加热温度过于接近或超过闪点则易产生气化现象。因此，使用中应控制加热温度。

3 重质燃油在船舶上的使用

(1)渣油的使用：渣油中掺入一定比例的轻质燃油成为重油（燃料油）或直接作锅炉燃料。

(2)重油（燃料油）的使用：可作柴油机或锅炉的燃料。

3.1 柴油机使用重油（燃料油）

3.1.1 柴油机烧重油（燃料油）的意义

1)节约船舶燃料费用：燃料费用是船舶运输成本的重要组成部分，燃用重油（燃料油）或燃用渣油和重柴油混合掺调的燃油，都可节省燃料费。

2)合理利用能源：海洋船舶动力以中、低速柴油机为主，具有燃用重质燃油的独特条件。合理利用能源，是节能的一个方面。

3)避免对陆地的污染：重质燃油的燃烧产物对空气的污染严重，对人口密集的城市影响大，如每吨含硫3％的燃油，燃烧后产生60 kg的二氧化硫，这会危害人类健康及农作物生长，使金属设备腐蚀等等。若在海洋船舶中燃烧这类重油，则上述影响大为减少。因此，海洋船舶对燃料含硫量一般不作限制。

3.1.2 柴油机使用重油（燃料油）的注意事项

1)装油

(1)轻质燃油与重质燃油装油管系应分开，以免重质燃油污染轻质燃油。如果共用管道，则应注意安排装油次序。

(2)重油（燃料油）的装油管系应有绝热包扎、蒸汽加温及轻油冲洗等设施，以防止重油（燃料油）在装油管系内冻结。

(3)要正确地掌握装油温度及密度，这样才能根据容积求得实际装油重量。

(4)从装油温度高低能明显表示出倾点，并可大致分析出所装油品的质量。这是一个值得参考的数据。

(5)在国外装油时，应在现场取得油样，并保存一定时间，以备在燃油质量产生问题时供验证之用。

(6)品种、产地和不同厂生产的油品，尽量不要装在一起，以免发生“不相容”的危险。如有必要时，要作相容性试验。为此，装油前必须将油仓柜残存油脚尽量抽吸干净，保持不同油种最少的相混量。

(7)装油前后，都要测量油驳（或油罐）各油舱的油位、温度、水尺和查看油尺表和管

路系统，测量本船各油轮的油位和船舶前后水尺，如果发现数量不符，要查清原因，妥善解决。

2)贮存与驳运

（1）保温：燃油在贮存中须保持适当温度。温度太高，则加速燃油气态化与油气蒸发，浪费蒸汽；温度过低，易造成高凝点燃油凝固。因此，对高凝点燃油应测定其平均凝点。应使油保持其最低温度在凝点5℃以上。由经验得知，装油时的燃油温度，可当作近似的燃油高倾点来决定贮存保温的温度。

（2）液位计：用一般的玻璃管或玻璃板液位计，易被重油（燃料油）污染，显示不出液位高低。应采用浮球式、吹气式或液力式液位计。绝不允许用塑料作液位计，否则很不安全。

（3）驳油：重油（燃料油）粘度大，驳运油的管道的直径应适当加大；驳运进泵温度，要控制在倾点以上5～10℃。油舱柜中加温的高低，要根据吸入管的长短粗细、吸入压头大小及绝热包扎的优劣而定。

3)预处理

（1）混合

调油厂根据船舶所有人要求，调出不同粘度的燃油供船舶使用。一些船舶则在船上自行掺调燃料油供中、低速柴油机使用。

①国内船舶混合油的品种：(a) 渣油掺重柴油；(b) 渣油掺轻柴油；(c) 重油（燃料油）掺柴油。

②掺渣比例的选取：新型柴油机在设计中较周到地考虑用重油(燃料油)，在说明书上对其粘度范围有较明确的规定。有些早期生产的柴油机如无上述规定时，可参照以下因素选用掺混比例。

(a) 转速：柴油机转速越高，允许燃油滞燃期与燃烧时间越短，由于渣油滞燃烧性能差，掺渣比例要下降。

(b) 扫气型式：柴油机中直流扫气要比横回流扫气质量好，在部分负荷时更为突出。直流扫气柴油机选用掺渣比可提高。

(c) 缸径大小：大缸径柴油机燃烧室形状与燃油雾化的匹配要求比小缸径柴油机为低，掺渣比可提高。

(d) 十字头与筒形话塞结构形式：前者扫气箱与曲柄箱分隔成二部分，可使用专用的汽缸油，燃烧产物不会进入曲柄箱循环油之中，有利于烧劣质油，可提高掺渣比。

(e) 扫气压力：扫气压力高，扫气效果好，有利于重油燃烧，掺渣比可提高。

(f) 燃油喷射压力：喷射压力越高，雾化油滴直径越小，有利于重质油的燃烧，这对中速柴油机来说尤为重要，因此可提高掺渣比。

(g) 热力参数：如在压缩终点气缸内的温度与压力等参数提高时，有利于重质燃油的燃烧，故热力参数较高时，掺渣比相应可选用高一些。

国内船用中、低速柴油机常用掺渣比范围见表2.2.4-28。

表 2.2.4-28　　**中低速柴油机掺烧国产渣油常用比例**

	柴油机结构形式	掺 渣 比 例
十字头	直流扫气	70%~90%
	横回流扫气	50%~70%
柴油机	横回流扫气质量不高	<50%
筒形活塞	较低速度	<50%
柴油机	中速	30%~50%

③船舶上混油的方式:

a) 用循环泵混合：该泵将两种燃油于混合油柜中不断循环泵送进行混合，见图 2.2.4-7。

(a) 混合油柜内要适当加温，一般为 60～70℃。

(b) 循环泵要有足够的排量，排量在数值上应大于混合油柜容量的 1/4 为宜。

(c) 混油要有充分时间，至少要保证混油柜内燃油循环 3 ～ 4 次的时间，否则混合不均匀。

(d) 混和油柜内，燃油管吸口与排出口位置要远离，以减少燃油混合中的死角。

(e) 混合油柜不宜过大，否则混和时间太长。如果混合时间较短，则油柜内易形成死角。

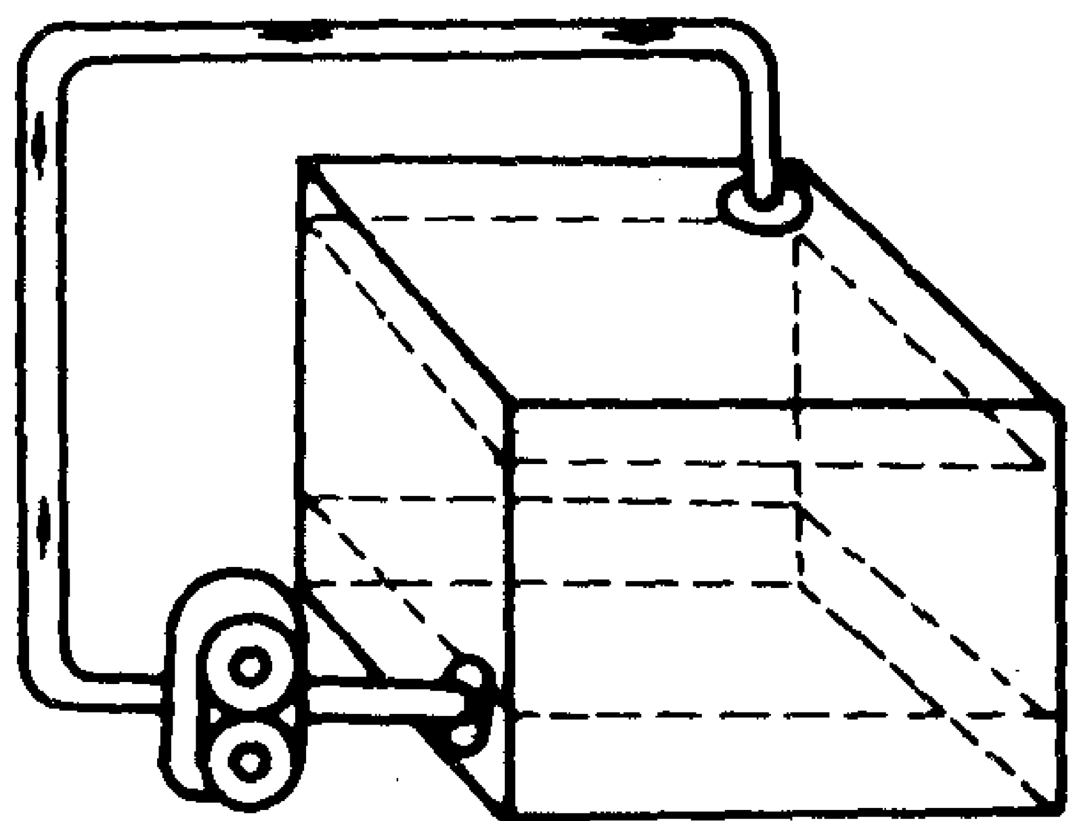


图 2.2.4-7　用输油泵混合渣油

用此混油方法，设备改装较易，比加热混合法的质量好。但操作不当或混油时间过短时，混合质量也不可靠。

b) 用混合装置混油：控制两种相混油的不同比例的装置有用变量泵、变速电机、变速器。如图 2.2.4-8 所示。

混油器的形式有动态混油器和静态混油器二种。

动态混油器：两种相混油通过动态混油器——搅拌器的搅拌进行混合，可适应流量较大范围内的变化，保证混合质量。但是，该混油器结构复杂，价格较高。

静态混油器：两种相混油以一定流速通过静态混合器时，受到多次切割、节流、撞击等搅拌作用，以达到混合的目的。在使用中要保持一定的流量，使燃油有足够大的流速通过，否则混合效果不良。因此，只有在额定流量附近工作才能保证混合质量。由于静态混油器结构简单，无运动部件，不易损坏，目前使用较广泛。

用加温方法混合：在混合油柜内按比例先装重柴油，再装渣油，加温至 60～80℃。由于两种相混油的密度不同，加热后燃油粘度下降，扩散、对流等作用增大，从而使之混合。混合时间根据加热蒸汽压力及流量、加热面积及油柜容量而定。加热混合后的燃油在短期内可不分层。这种方法的缺点是油的混合很不均匀，混油时间要求较长，而且很难使渣油与轻柴油混合。但用此法不需要改装设备。在推行掺渣的初期，此法起了一定作用，现已较少使

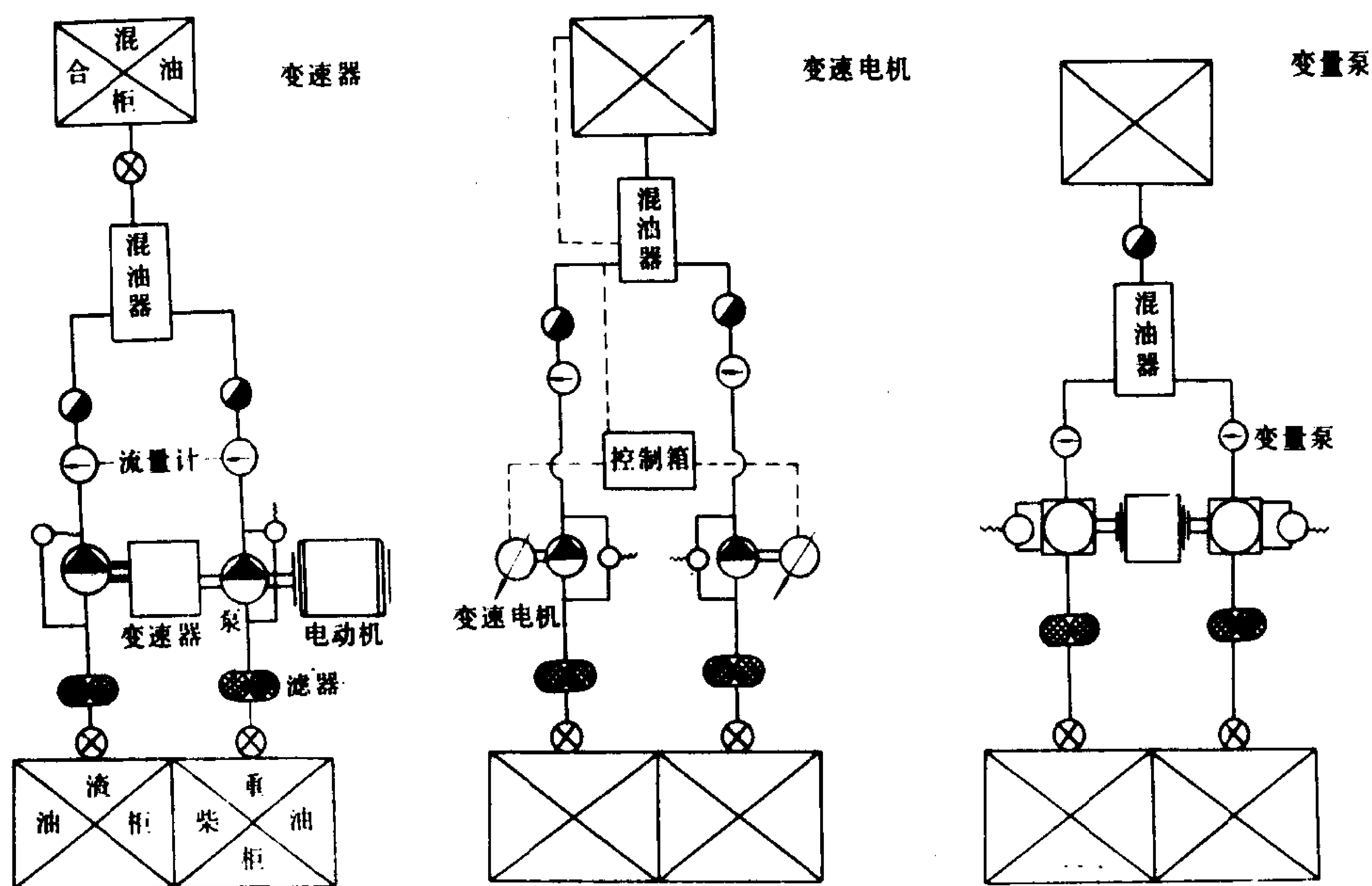


图 2.2.4-8　控制掺混渣油比例的三种装置

用。

混油不均匀的后果:

①油柜中燃油密度各处不同，加速燃油分层。

②密度不断变化的燃油很难与分油机的调节环（比重环）相匹配，这会影响分油效果，甚至产生跑油现象。

③混合油的粘度不均匀，影响分油温度与流量对粘度的配合，不利于分油。同时由于粘度计存在着调节滞后现象，不能及时调整不断变化的粘度，使喷油雾化的粘度不稳定，不利于燃烧。

④混合油成分不均匀，不利于燃烧。

⑤混油不均匀，使进入喷油泵的燃油重量不断地变化，进入气缸内的喷油量亦随之变化，致使转速产生波动。

⑥混合油如含轻质油较多时，而加热器的温度未及时降低，会产生气化现象。轻者使转速不稳定，重者会导致停车。

混合油的特性

混合油的特性见表 2.4.2-29 和图 2.4.2-9～2.4.2-11 所示。

表 2.2.4-29　国产 250 号重油和 30 号重柴油混合后的特性

30 号柴油（%）		150	60	50	40	30	20	10	0
250 号重油（%）		0	40	50	60	70	80	90	100
高热值 低热值（kJ/kg）		45657.054 42570.031	45079.275 42144.328	44991.352 42081.526	44802.946 41943.362	44635.474 41775.89	44334.025 41499.561	44204.234 41403.265	44078.63 41319.529
元素分析	C（%）	85.84	85.76	85.76	86.68	85.69	85.60	85.6	85.54
	H（%）	13.35	12.95	12.83	12.72	12.61	12.48	12.33	12.14
	N（%）	0.11	0.23	0.27	0.29	0.33	0.35	0.38	0.43

续上表

元素分析	O (%)	0.36	0.46	0.49	0.52	0.55	0.61	0.68	0.72
	S (%)	0.13	0.29	0.33	0.37	0.40	0.44	0.48	0.54
	A (%)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
水分	(%)	22							
粘度	恩氏粘度(°E)	1.53(57.8℃)	5.44(57.8℃)	11.22 (57.8℃)	12.66 (57.8℃)	12.00 (55℃)	11.71 (70℃)	8.95 (95℃)	7.83 (120℃)
	雷氏粘度(S)	42(57.8℃) 1.41(45℃)	150(57.8℃) 63(70℃)	340(57.8℃) 93(75℃)	375(57.8℃) 118(80℃)	360(55℃) 140(80℃)	355(70℃) 180(90℃)	305(95℃)	250(120℃)
凝点	(℃)	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5	24.5	24.5
闪点	(℃)	146	170	182	194	215	230	245	274
燃点	(℃)	164	193	204	226	235	255	278	315

图 2.2.4-11 用来计算用两种组分掺合中间燃料油时各组分的百分比。其比率的准确性为1％到2％。由于不同燃油粘度掺合特性的变化和燃油粘度测自不同的温度。掺合后的组分

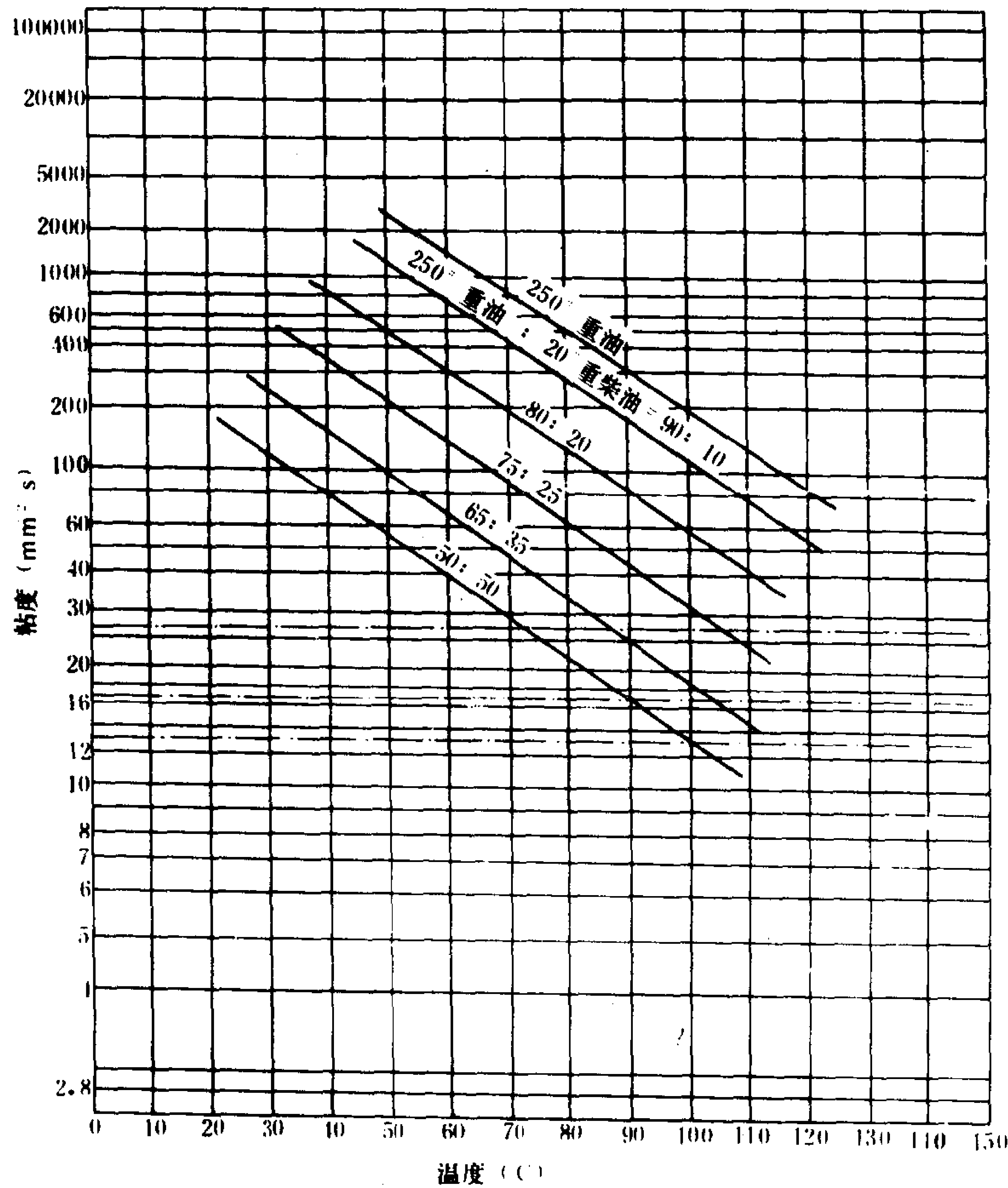


图 2.2.4-9 国产250号重油与20号重柴油按不同重量比例混合后的粘温曲线

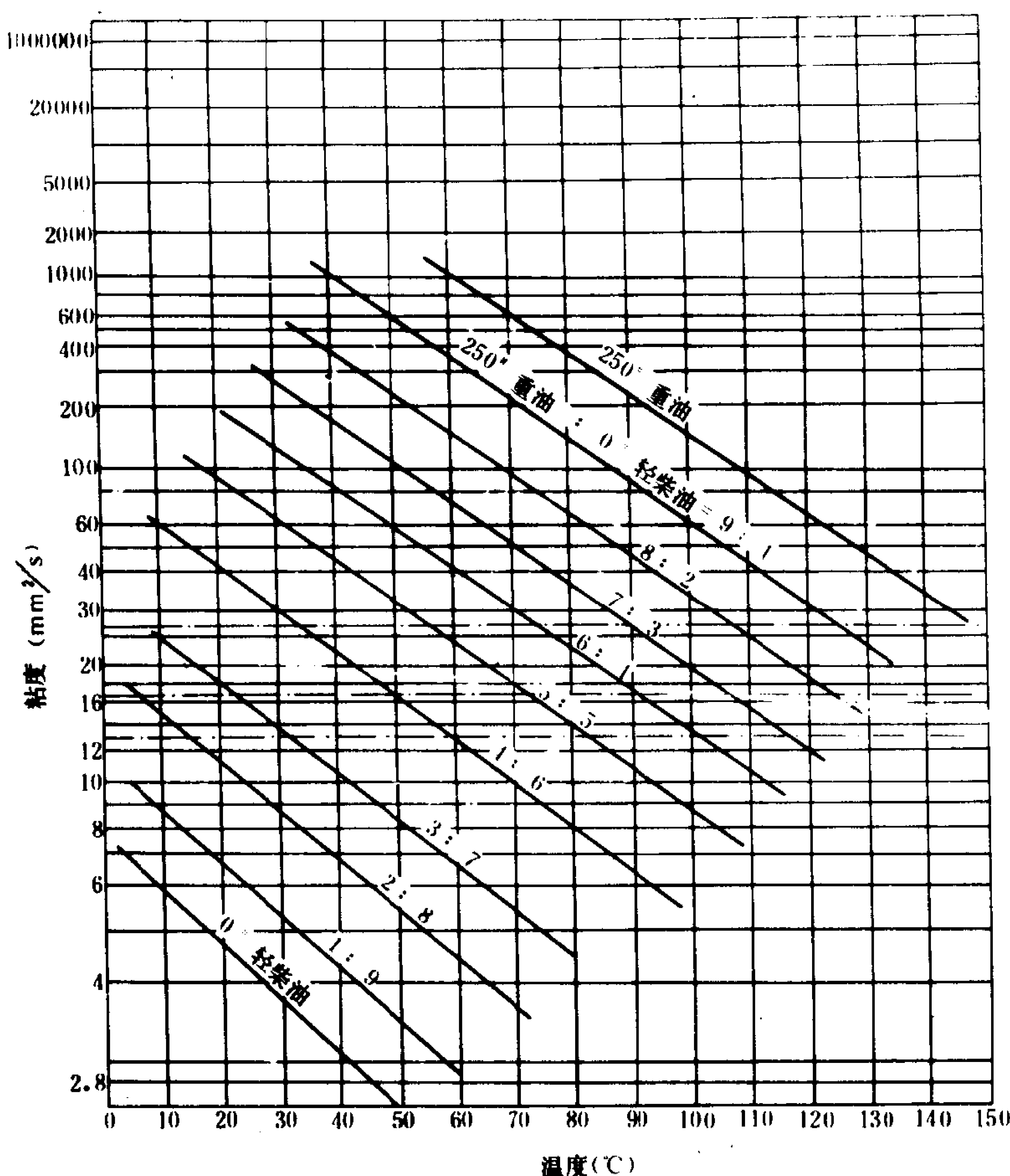


图 2.2.4-10　国产 250 号重油与 0 号轻柴油按不同重量比例混合后的粘温曲线

的粘度应当有适当的偏差。掺合后的组分的实际粘度必须经常检查，确保该组分在规定的粘度范围内。当各个待掺合的组分来自不同的原油或炼油厂时，进行这种检查特别重要。

估算高、低粘度待掺合组分的百分比以掺合出预定粘度的中间燃料油的方法：在图的左边线取较高粘度组分的粘度的一点，在图的右面取较低粘度组分的粘度的一点，两点联直线。这直线跟预定要掺合的中间燃料油的粘度线（水平线）相交，交点就是各待掺合组分的百分比，通过这交点作垂线，与上边线相交，交点就是低粘度组分的百分比，与下边线交点就是高粘度组分的百分比。

例：粘度为 420 mm²/s（50℃）的燃料油跟 3.8 mm²/s（40℃）的船用柴油需掺合为IF60的中间燃料油（50℃的粘度为 60 mm²/s），这时，在左边线上取“420”的一点，右边线上取“3.8”的一点，两点联直线，与注有IF 60 的水平线相交，通过交点作垂线，与上边线的交点显示船用柴油的百分比为 25.7%，与下边线的交点显示燃料油的百分比是 74.3%。

（2）过滤

①滤器：重油（燃料油）中杂质多，粘度大，滤器的流通面积及滤网孔眼要适当放大。试验表明，250 号重油（渣油）在 128℃ 时，通过 264 目滤网时会产生堵塞断油现象，后

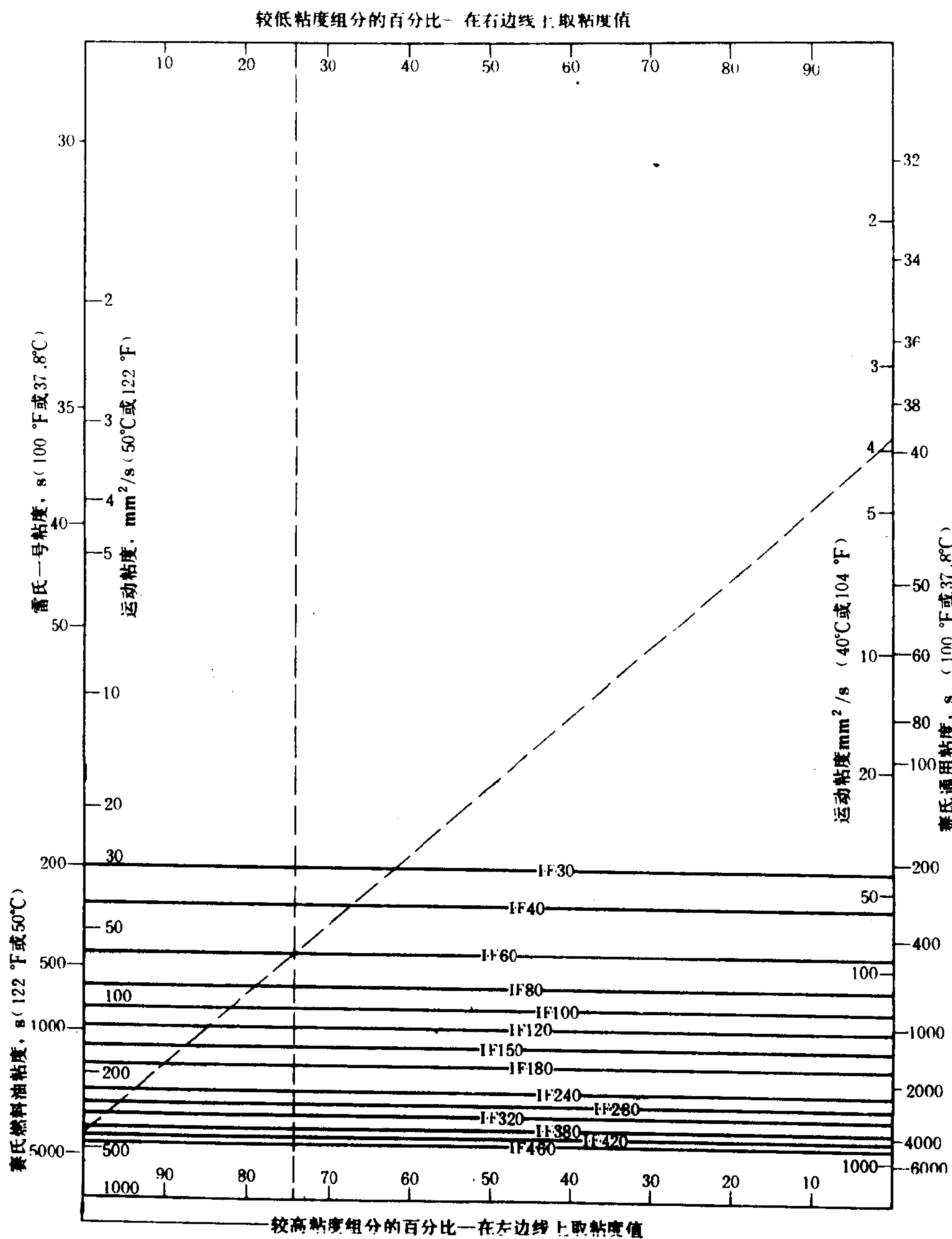


图 2.2.4-11 混合油粘度的计算

改用158.8目滤网，则滤器未发生堵塞。选择柴油机用过滤器金属滤网的粗细可参阅本章2.7.1。

②磁性滤器：能除去油品中的铁与其化合物，以减少对喷油泵与喷油嘴偶件、气缸套与活塞环的危害作用。

（3）分油及加热

预处理除混合及过滤外，还必须对重油（燃料油）进行分油及加热。详见本手册动力装置部分的有关内容。

附　录

1　国际标准组织（ISO）计算燃油热值的公式和图表

根据ISO8217:1987(E)，燃油的热值可按下列公式计算：

1）高热值Q_g

$Q_g=(52190-8802\rho^2 10^{-6})[1-0.01(x+y+s)]+9.420(0.01s)$ MJ/kg

2）低热值Q_d

$Q_d=(46704-8802\rho^2 10^{-6}+3.167\rho 10^{-3})[1-0.01(x+y+s)]+0.01(9420s-2449x)$　MJ/kg

式中：

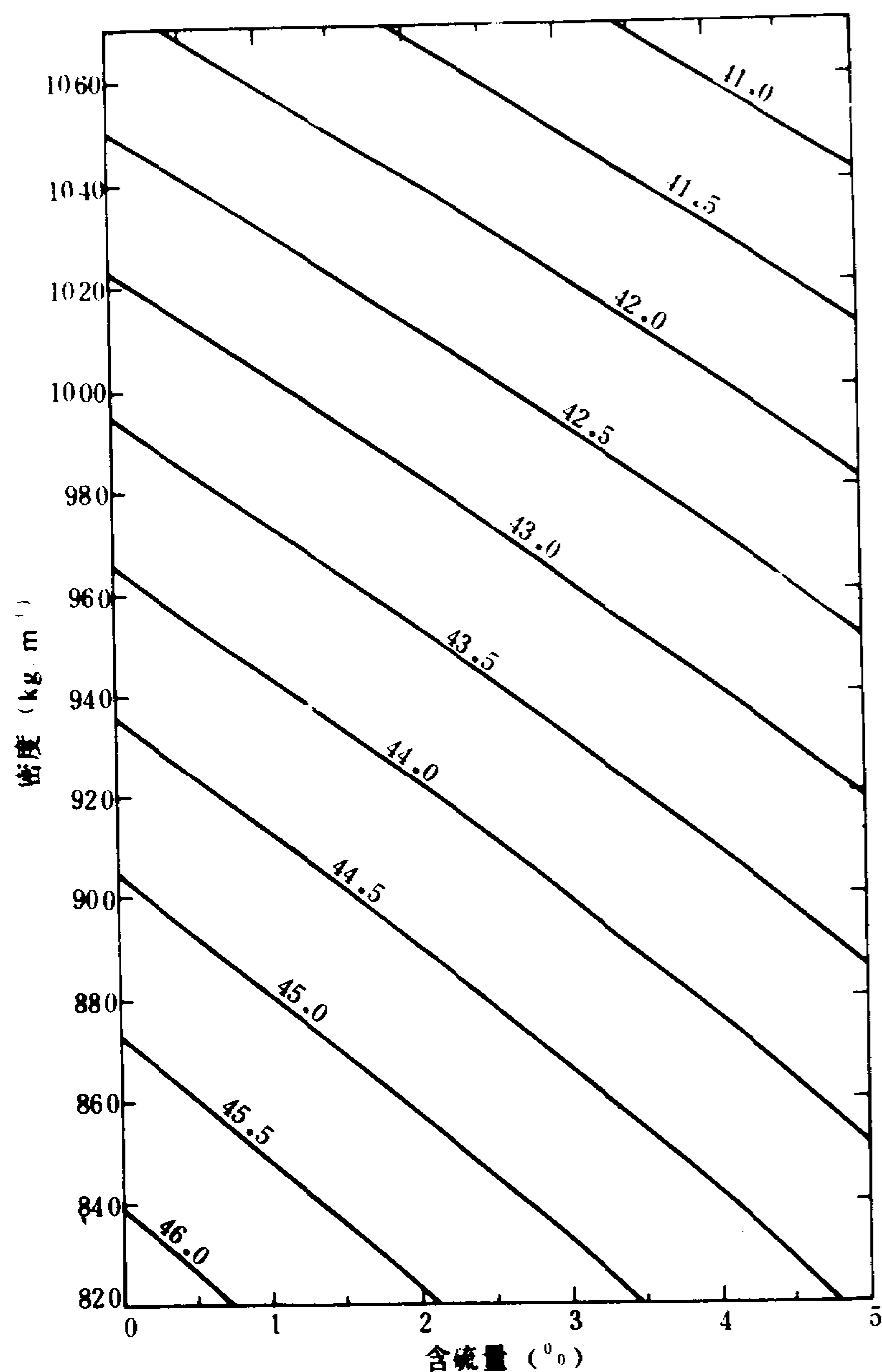
ρ——燃油15℃时的密度，kg/m³；

x——燃油中含水量的百分数（质量）；

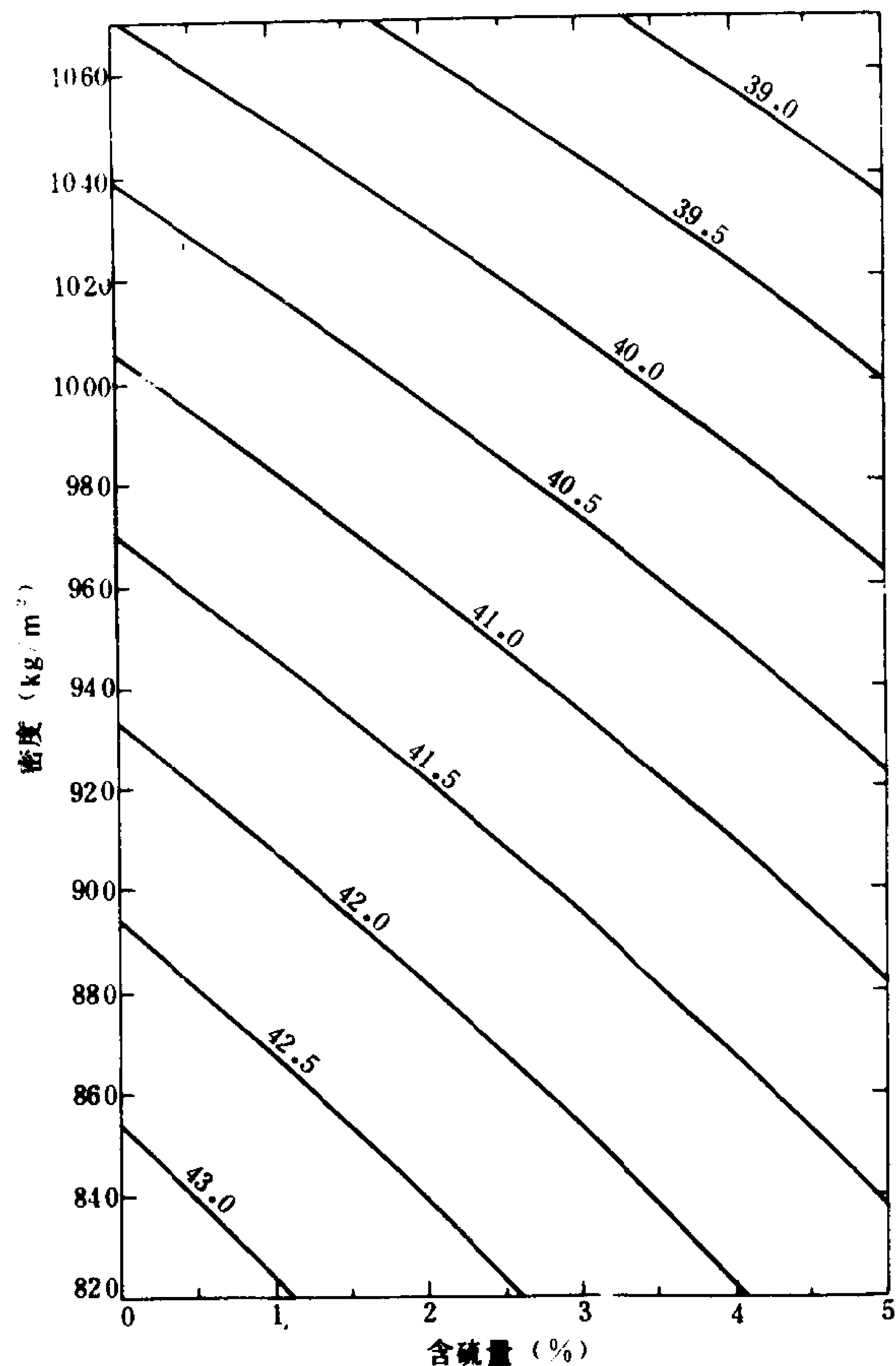
y——燃油中灰分含量的百分数（质量）；

s——燃油中含硫量的百分数（质量）。

燃油的高、低热值也可根据密度和含硫量分别按附图2.2.4-1和附图2.2.4-2直接读出。图中的斜线表示热值（MJ/kg）。考虑灰分和水分含量的修正热值可从读数中减去0.01（$x+y$）。



附图 2.2.4-1　燃油的高热值



附图 2.2.4-2　燃油的低热值

2　船舶发动机及设备使用的燃油一览表

船舶发动机及设备使用的燃油见附表 2.2.4-1。

附表 2.2.4-1　**船舶发动机及设备使用的燃油**

发动机或设备	使用的燃油及说明
应急设备(救生艇、应急发电机、应急空气压缩机、应急消防泵等)柴油机	低温柴油，要符合ISO8217的要求，具体内容请参阅本篇第 2 章。
小型辅助锅炉	无燃油加热设备或间歇使用时，用轻柴油或船用柴油，气温允许时，可用国产重柴油； 有燃油加热设备连续使用时，用燃料油或国产重柴油。
大型锅炉	船用燃料油或中间燃料油
低速柴油机，中速筒状活塞柴油机（作主机用）	正常航行时用船用燃料油或中间燃料油，可根据燃油供应情况，发动机设计的要求和燃油处理设备的能力来决定具体的燃料油牌号。如果加热设备、伴热系统正常，则机动运转时可与正常航行的用油相同，否则应用国产重柴油或船用柴油。
中、高速筒状活塞柴油机（作辅机用）	如无燃油加热设备，按柴油机说明书的用油要求选用轻柴油或船用柴油；如有加热设备，可按具体情况选用重柴油； 如柴油机说明书规定可用燃料油，且燃油系统中有关用燃料油的设备齐全，可以用燃料油。

3 船用燃油标准对照表

附表 2.2.4-2 所示为各种船用燃油标准对照表。

附表 2.2.4-2

船用燃油标准对照表

项目	燃油质量	直馏油				重质燃油																	
质量指标	雷氏 1 号粘度标准	MGO	船用柴油			300 s				600 s	1500 s		3500 s				6000 s				7000 s		
	常用名称	MGO	直馏 MDO		MDO	IF-40				IF-80	IF-180		IF-380				IF-600				IF-700		
	英国船用标准(BSMA)	M1	/	M2	M3	/		M4	/	M5	/	M6	/	M7	/	M10	M8	/	/	M11	M9	/	M12
	国际内燃机协会(CIMAC)	/	/		1	A10	B10	/	C10	D15	E25	F25	/	H35	K35	/	H45	K45	/	/	H55	K55	/
	国际标准组织(ISO-8217)	DM-X	DM-A	DM-B	DM-C	RM-A10	RM-B10		RM-C10	RM-D15	RM-E25	RM-F25	RM-G35	RM-H35	RM-K35	RM-L35	RM-H45		RM-K45	RM-L45	RM-H55		RM-L55
密度,15℃ (kg/m³)	最大		890	900	920	975	991			991	991		991		—	—	991	1010	—	—	991	1010	—
运动粘度 (mm²/s) 40℃时	最小	1.40	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
运动粘度 (mm²/s) 40℃时	最大	5.50	6.00	11.0	14.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
运动粘度 (mm²/s) 50℃时	最大	—	—	—	—	40				80	180		380				500				700		
运动粘度 (mm²/s) 80℃时(BSMA-100)	最大	—	—	—	—	15				25	45		75				100				130		
运动粘度 (mm²/s) 100℃时(ISO-8217)	最大	—	—	—	—	10				15	25		35				45				55		
闪点,闭杯(℃)	最小	43	60	60	60	60				60	60		60				60				60		

项目	燃油质量		直馏油				重质燃油																		
	雷氏1号粘度标准		MGO	船用柴油			300 s				600 s	1500 s		3500 s				6000 s				7000 s		
	常用名称		MGO	直馏MDO		MDO	IF-40				IF-80	IF-180		IF-380				IF-600				IF-700		
	英国船用标准(BSMA)		M1		M2	M3			M4		M5		M6		M7		M10	M8			M11	M9		M12
	国际内燃机协会(CIMAC)					1	A10	B10		C10	D15	E25	F25		H35	K35		H45	K45			H55	K55	
质量指标	国际标准组织(ISO-8217)		DM-X	DM-A	DM-B	DM-C	RM-A10	RM-B10		RM-C10	RM-D15	RM-E25	RM-F25	RM-G35	RM-H35	RM-K35	RM-L35	RM-H45		RM-K45	RM-L45	RM-H55		RM-L55
上倾点(℃)	冬季(1/12~31/3)	最大	—	-6	0	0	0	24			30	30		30				30				30		
	夏季(1/4~30/11)	最大	—	0	6	6	6	24			30	30		30				30				30		
劳氏残炭值(%)		最大	—	—	0.25	2.50	-	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
劳氏10%残炭值(%)		最大	0.20	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
康氏残炭值(%)		最大	—	—	—	—	10		12	14	14	15	20	18	22		—	—	22.0	—	—	22		—
灰分(%)		最大	0.01	0.01	0.01	0.05	0.10				0.10	0.10	0.15	0.15	0.20			0.20				0.20		
水分(%)		最大	—	—	0.30	0.30	0.50				0.60	1.00		1.00				1.00				1.00		
含硫量(%)		最大	1.00	1.50	2.00	2.00	3.50				4.00	5.00		5.00				5.00				5.00		
十六烷值		最小	45	40	35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
抽提法沉淀物(%)		最大	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
浊点(℃)		最大	-16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钒(mg/kg)		最大	—	—	—	100	150		250	300	350	200	500	300	600			600				600		
铝(mg/kg)		最大	—	—	—	30	30		—	30	30	30		—	30		—	30	—	—		30		

第5章 代用燃料

1 甲醇

以甲醇作为发动机的代用燃料，我国和世界各国都在进行试验研究，并已取得了初步的成果。

甲醇可用煤或天然气加工而成，因而资源丰富。

无论是点燃式或压燃式发动机均可使用甲醇。目前使用甲醇为代用燃料的主要方法有下列几种:

（1）在压燃式发动机中采用甲醇柴油乳化混合燃料;

（2）在压燃式发动机中采用甲醇与柴油的双燃料法;

（3）在点燃式发动机中采用（或部分采用）甲醇燃料;

（4）在点燃式发动机中采用甲醇裂解燃料。

甲醇的特点是十六烷值很低，辛烷值很高，有毒，对金属有腐蚀作用，粘度较小，因而润滑性能较差等，使用时应予以注意。

柴油和甲醇的主要性质的对比见表2.2.5-1。

表2.2.5-1 甲醇和柴油的主要性质对比

性质	单位	柴油	甲醇
密度	kg/m^3	860	796
沸点	℃	180～330	65
自燃温度	℃	200～220	470
可燃极值在空气中所占体积的百分计		1.5～8.2	6.7～36.0
低热值	kJ/kg	42 705	19 887
气化潜热	kJ/kg	301	1.101
动力粘度(20℃)	Pa·s	3.82×10^{-3}	0.59×10^{-3}
理论空燃比		14.6	6.4
十六烷值		50	3
辛烷值	(RON)	30	108

1.1 甲醇-柴油乳化混合燃料

完全乳化的混合燃料应是由柴油包着甲醇的液滴组成。乳化混合燃料中甲醇的含量一般不能超过30%，否则会使发动机起动困难。表2.2.5-2所示为甲醇-柴油乳化混合燃料的主要性质。

试验结果表明:

（1）当甲醇含量不超过30%时，发动机的有效热效率稍高于燃用纯柴油时的情况;

（2）废气中的CO、HC和NO_x的排放浓度均低于我国国家标准及美国联邦标准。

1.2 甲醇与柴油并用的双燃料法

在此法中，甲醇通过安装在进气管口的气化器与空气一起吸入缸内。气化器的节流阀，加速泵和其他零件被拆除。甲醇的吸入量通过可调的主量孔进行控制。在气化器和发动机之间装有一个电加热装置，以加热甲醇-空气混合气。喷入缸内的柴油，压缩着火后形成火焰，再将吸入的甲醇-空气混合气点燃。

在一台采用“复合式”燃烧系统的两缸、四冲程高速柴油机（缸径为105 mm，行程为120 mm，压缩比为17，额定转速为1500 r/min）上进行的试验表明:

（1）发动机以双燃料法燃用甲醇量可达甲醇和柴油总消耗量的86%，而且热效率和功率输出都有提高;

（2）当甲醇吸入量为82%时，有效热效率达最高值39.5%，比纯柴油高6.1%，功率输出相应地增加了22.2%;

表 2.2.5-2 甲醇-柴油乳化混合燃料的主要性质

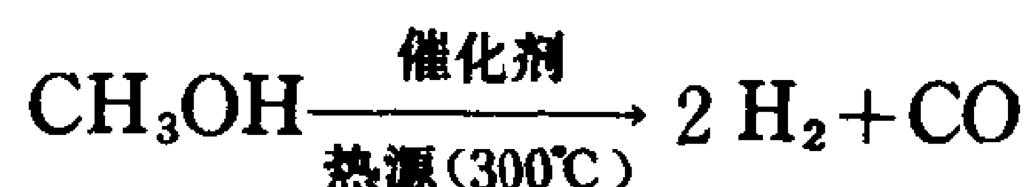
性质 \ 燃料	粘 度 (Pa·S×10^{-3})	密 度 (kg/m^3)	低热值 (kJ/kg)
0 号柴油	3.83	860	10775.90
甲 醇	0.59	796	4951.16
10%甲醇	4.14	845	9667.42
12%甲醇	4.52	845	9520.00
15%甲醇	4.79	840	9334.69
20%甲醇	5.21	840	9108.75
30%甲醇	2.92	835	8780.80

(3)如果进气充量温度保持在18℃左右，双燃料发动机可以满意地工作；

(4)在双燃料工作的情况下，NO_x排放量降低了，但HC和CO排放量却增高了。排气中未燃烧的甲醇量是很低的，一般低于140 ppm，烟度和排气温度也显著地降低。

1.3 甲醇裂解燃料

甲醇在一定条件下可裂解为H_2及CO，即有以下反应：



$$CH_3OH \xrightarrow[\text{热源(300℃)}]{\text{催化剂}} 2H_2 + CO$$

此反应为吸热反应，反应后的裂解气的热值较蒸气甲醇提高14%，较液体甲醇提高20%。但反应需在催化剂的作用下，并在250～350℃的条件下进行。反应所需的热量可由发动机的排气提供。

图2.2.5-1所示为甲醇裂解燃料点燃式发动机的原理图。

液体甲醇进入一个由排气供热的蒸发器之后，成为过热的甲醇蒸气，并进入机载反应器内。机载反应器出口的燃料气为H_2、CO、未裂解的甲醇蒸气以及少量的甲烷、二甲醚等。这种富氢的混合气经冷却器冷却后进入混合器中与空气混合，然后进入发动机气缸中燃烧。因此，在甲醇裂解燃料点燃式发动机中，燃料箱中所贮存的是液体甲醇，而燃烧的则是一种富氢的混合气。

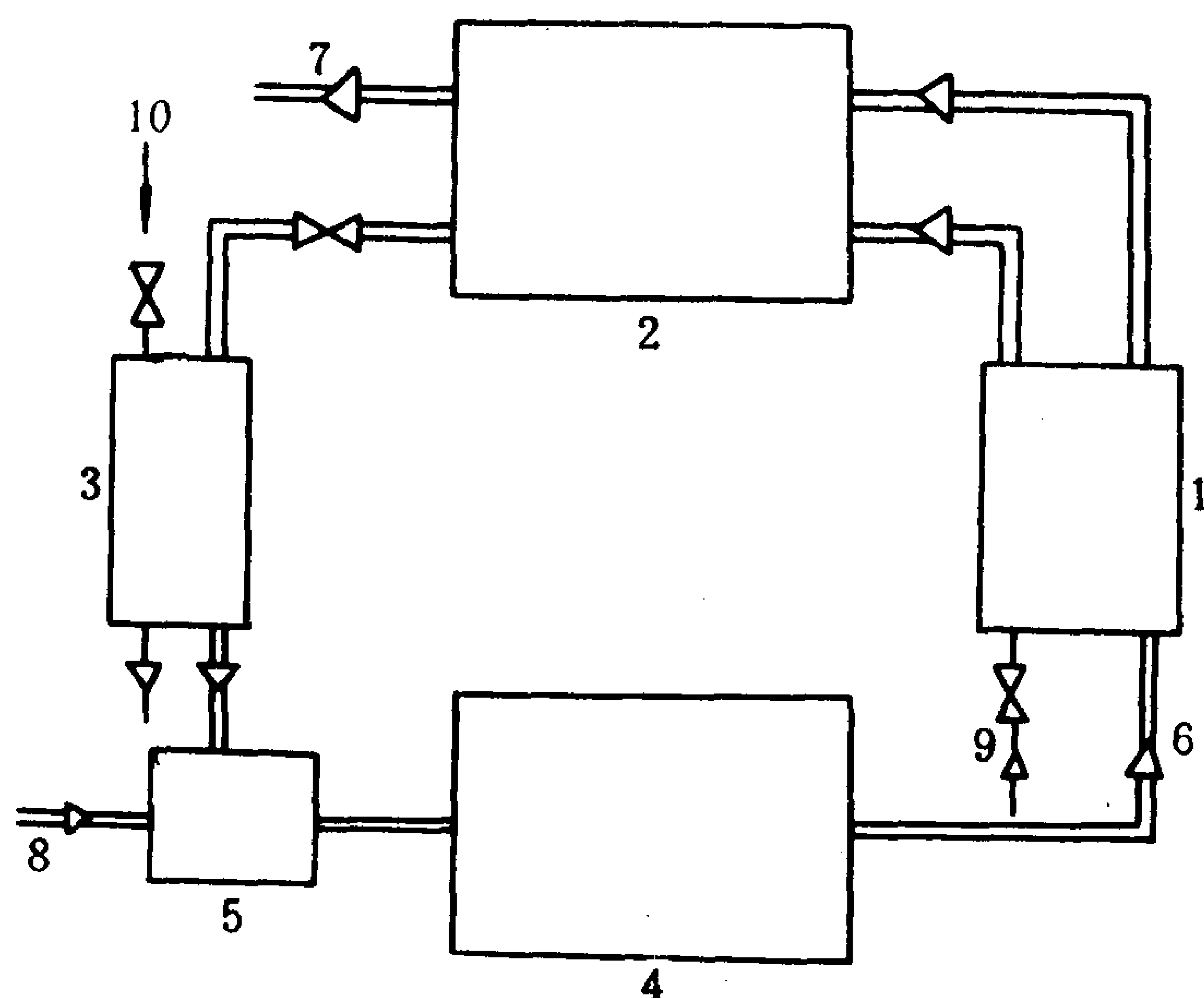


图 2.2.5-1 甲醇裂解燃料点燃式发动机原理图

1-蒸发器；2-反应器；3-冷却器；4-发动机；5-混合器；6-排气进入蒸发器；7-废气排出；8-空气进入混合器；9-甲醇进入蒸发器；10-冷却器冷却水进口

这种方法的优点是：

1)发动机具有较高的热效率，其原因是：

(1)裂解燃料气的辛烷值较高，因而可使压缩比有较大幅度的提高；

(2)由于裂解燃料气富氢，因而提高了燃烧速度，使淬冷层变薄，并可实现稀薄燃烧；

(3)由于废热的利用，因而提高了燃料的热值。

2)由于部分燃料已经过裂解，发动机的排放污

染更易于控制。

3)腐蚀、润滑等方面的问题可能得到缓解。

单纯的甲醇裂解燃料点燃式发动机大约只能发出原型汽油机功率的75%。升功率下降的原因是:

1)由于燃料气富氢，在空燃比小于1.3时，易发生回火或爆震;

2)由于燃料气占据了一部分气缸容积，使进入的新鲜空气量减少。

为了恢复发动机的功率，在高负荷下，采用在裂解气中添加液体甲醇的办法，可有效地抑制回火与爆震的发生，因此，也可以称这类发动机为液体甲醇-裂解气发动机。

裂解甲醇要借助于排气的热能，因此，这种甲醇裂解燃料发动机不具有自起动能力，需要在暖机后方能切换至裂解气运行工况。

在492 Q汽油机基础上改装的甲醇裂解燃料点燃式发动机的试验表明:

(1)在点燃式发动机上可用甲醇完全代替汽油;

(2)在发动机整个工况范围内，有效热效率比汽油机平均提高30%，最高的有效热效率η_e达37%，达到中、高速柴油机的水平;

(3)排放、污染大大低于现有内燃机水平。CO的排放水平大大低于原型机，HC也大大低于液体甲醇M 100发动机。

2 煤油浆(COM)

将煤粉碎成2～4μm的特细粒子，并将其与加有表面活化剂和防沉淀添加剂的柴油混合，即形成一种单分散性的混合悬浊液——煤油浆。以美国俄亥俄州阿克伦域的联合生产公司所配制的煤油浆为例，其成分如下:

柴油	81.27%
煤	16.67%
卵磷脂	2.06%
“Ca	-O-Si	”	9.07 g

卵磷脂是作为一种表面活化剂加入的，用以控制煤油浆粘度。“Ca | -O-Si | ”为一种胶态二氧化硅，是用于稠化和防沉淀的添加剂。这两种添加剂对柴油机的性能似乎均无影响。

微粉化的煤粒直径近似按正态分布，其平均直径为2.5μm，有一道工序可将粒子的直径范围限定在0.3～4.5μm。

煤油浆与形成煤油浆的柴油及褐煤的一些性质见表2.2.5-3。

表2.2.5-3　　煤油浆的成分和性质

元素分析%	褐煤(干)	柴　油	煤浆油(所使用的)
卵磷脂	—	—	2.06
氢	4.6	13.3	11.58
碳	66.7	85.9	80.93
氮	0.7	0.02	0.12
氧	24.3	—	4.06
硫	0.3	0.78	0.68
灰	3.4	—	0.57
高热值(kJ/kg)	26.790	45.140	40.560
低热值(kJ/kg)	25.890	42.460	38.320

在单缸、小型四冲程、卧式发动机(缸径为127 mm，行程为152.4 mm，压缩比为18.8，额定转速为400 r/min)上的试验表明:

(1)由于煤油浆按其成分是一种燃烧较慢的燃料，因此，要研制一种性能良好，工作可靠的喷油系统。这种系统要能适应煤油浆的性质，并能使煤油浆的喷射能充分提

前，以确保其有效地燃烧；

（2）发动机需配置一个非冷却的预燃室。煤油浆在此室内的滞留时间可能占整个压缩过程的相当大一部分；

（3）有效耗油率约增加了 2%；

（4）由于煤油浆中的灰分增加，会引起喷油器的过度腐蚀及活塞环、缸套的磨损。

3 煤水浆

我国已基本建成两座煤水浆制备厂，即抚顺矿务局的胜利制浆厂（年产 50000 t，和枣庄矿务局的八一制浆厂（年产 30000 t）。两厂所生产的煤水浆的主要技术数据如表 2.2.5-4 所示。

表 2.2.5-4　**煤水浆的主要性能指标**

技术指标 / 生产厂	浓　度 (%)	平均粒度 (μm)	粘　度 (Pa·s)	灰　分 (%)	低热值 (kJ/kg)
胜利浆	67	49	1.588	5.72	19435
八一浆	69.46	64	1.049	7.62	20744

4 溶炼煤基油（SRC-II）

表 2.2.5-5 给出了SRC-II中等馏分燃料和与之对比的船用柴油（MDF）的性质。

表中所示的燃料分析表明，SRC-II燃料的十六烷值很低，小于 25.5；而自燃温度却很高。因此，在发动机中着火很困难。单独使用SRC-II燃料将不可能获得满意的性能。为此，需与柴油混合使用。试验结果表明：在柴油机中利用SRC-II燃料的关键是提高压缩行程终点气缸内空气的温度。燃用SRC-II燃料运转的发动机要作某些修改，以便燃用混合燃料或引喷十六烷值较高的燃油，特别是在低负荷时尤为必要。

表 2.2.5-5　**溶炼煤基油SRC-II MD及船用柴油MDF的性能指标对比**

	SRC-II MD	MDF		SRC-II MD	MDF
相对密度 15℃	0.9765	0.8820	回收率（%）	98.0	98.5
粘度 SSU38℃	37.7	39.3	十六烷值	<25.5	44.1
闪点PM(℃)	63	96	自燃温度	502	313
残碳(10%残渣)			微量元素含量(ppm)		
(重量%)	2.0	0.03	锑	9	12
热值			钙	20	50
高热值（kJ/kg）	40510	46036	铬	3	1
低热值（kJ/kg）	37895	42566	铁	4	1
硫（%）	0.26	0.13	铅	4	1
灰分（ppm）	21.4	3.13	磷	30	60
馏分（℃）			硅	3	2
初馏点	179	232	钠	5	5
50%馏分	293	241	钒	1	1
终馏点	317	353			

第 6 章　燃料添加剂

1　燃料添加剂的作用和分类

为了改善燃料的性能，可向燃料中加入各种添加剂。燃料添加剂按其作用的不同可分为清净剂、防冰剂、流动性能改进剂、降凝剂、抗氧化剂、缓蚀剂、抗爆剂和辛烷值改进剂、助燃剂和燃料组合剂、抗静电剂、抗微生物剂及其他类型添加剂等。

1.1　清净剂

1.1.1　气化器多效清净剂

这类清净剂能使气化器保持清洁，减少气化器内的沉渣。可作为气化器多效清净剂的有下列各种添加剂：

(1)马来酐和多胺的反应产物；
(2)聚异丁烯-苯酚-表氯醇-胺的加合物；
(3)聚异丁烯基丙酸-多胺的反应产物；
(4)四氢化邻酞酸酐-多胺的反应产物；
(5)酰化的多烷撑多胺；
(6)胺类和多胺的曼里斯盐 (Mannich Base)；
(7)二苯基醇丙烷-烷基琥珀酸酐-多胺；
(8)支链烷基，N-羟基烷基烷撑多胺；
(9)羧酸酯和含氮的分散剂；
(10)甲苯基多胺；
(11)苯氧基丙醇二氨类和氨基醇；
(12)羟基芳基多羧酸酯-酰胺；
(13)氨基-取代醚类；
(14)脂肪酸烷基二氨基酰胺；
(15)用烃基胺取代的丙酸脂；
(16)取代琥珀酰胺酸；
(17)N-烃基-N杂环多胺；
(18)苯酚-醛-胺的缩合产物和聚烯；
(19)氨基磺酸-杂环丙烷-胺的反应产物；
(20)石油磺酸-多胺-硼化物；
(21)石油磺酸-胺-尿素的加合物；
(22)脂肪酸-三醇胺-磺酸的反应产物；
(23)磺化的单元羧酸-多胺的反应产物；
(24)多酰胺烃基磷酸氢盐；
(25)磷酸胺盐脂；
(26)多羟甲基脂类化合物；
(27)清净剂和富芳烃矿物油；

(28)羧酸酯和酯类型的分散剂。

1.1.2 清净剂和分散剂

这类添加剂可使燃烧室内的碳垢减少并使由于燃烧产物漏入曲轴箱而引起的滑油变质现象得到缓解。属于这类添加剂的有:

(1)烃取代羟甲基酚;
(2)聚丁烯基-聚羟基烯醇的产物;
(3)酯化羧基共聚物-联氨的产物;
(4)烷撑多胺-卤代聚合物-二硫化碳;
(5)含氮杂环化合物;
(6)聚氧化乙烯多胺曼里斯盐产物;
(7)聚丁烯胺和润滑油;
(8)氧化乙烯-丙烯聚合物-羧酸产物;
(9)氧化聚烯-多胺的反应产物;
(10)羟基化和胺基化的聚合物;
(11)烃基胺单元羧酸盐;
(12)硫脲-酰化多胺的反应产物;
(13)硫代烷基酚盐的喷雾后处理;
(14)含氮多金属络合物;
(15)烷基酚的硼酸酯和磷酸酯的衍生物与甲醛的产物;
(16)丁二酸的甲缩醛、乙缩醛和缩酮的衍生物;
(17)内酯的反应产物。

1.1.3 进气阀清洁剂

这类添加剂有:

(1)苯肼化合物;
(2)低分子和高分子烃基胺的混合物;
(3)碳酸钠;
(4)高盐性磺酸盐;
(5)矿物油馏分;

1.2 防水剂

当气温在−5.56~10℃，相对湿度大于65%，并且汽油的挥发性很高(干点低于149℃)时，在汽化器内最容易结冰。而汽化器和燃油管道中结冰，尤其节气阀片和阀片附近的器壁上结冰，是使发动机失速的主要原因。为解决此类问题，可在燃料中加入防冰添加剂。属于这类添加剂的有:

(1)亚油酸二聚-三聚酸和羟基化合物;
(2)胺-表氯醇和多羟基醇的混合物;
(3)羧酸胺盐酯;
(4)链锯用防冰组合剂;
(5)硝基酮化酰胺;
(6)N-取代吗啉;

(7)取代的四氢嘧啶;
(8)苯酚-醇基胺-甲醛的反应产物;
(9)聚烯-亚硝酰氯-胺的反应产物;
(10)聚烯和聚氧化烯化合物;
(11)卤素1,2-环氧丙烷和N-烷基多胺的聚合物;
(12)烷基铵链烷膦酸烷基酯;
(13)调聚烃的磷化物。

1.3 流动性能改进剂和降凝剂

一些石油中间馏分的燃油(如柴油)含有正构石蜡烃-石蜡,这些石蜡在低温下趋于以大颗粒晶体状态沉降,形成凝胶,使燃油失去流动性,造成泵送困难。同时,石蜡结晶还会堵塞燃油管路、过滤器和滤网。流动性能改进剂和降凝剂可使燃油的倾点降低,并可改变燃油中析出的石蜡结晶的性质,进而减少石蜡晶体变成凝胶的倾向。下列各类添加剂为流动性能改进剂和降凝剂:
(1)长链α-烯聚合物;
(2)α-烯聚合物;
(3)α-烯的二聚物;
(4)脂肪酸乙烯酯共聚物;
(5)醋酸乙烯酯共聚物和氢化萘;
(6)醋酸乙烯酯共聚物和砜共聚物;
(7)乙烯共聚物及其混合物;
(8)乙烯共聚物和蜡;
(9)含羧酸N-酰胺基乙脂的聚合物;
(10)苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物;
(11)氢化聚丁二烯;
(12)丙烯酸酯聚合物和4-乙烯基吡啶;
(13)丙烯酸氯丙啶乙酯及共聚物;
(14)烷基芳烃材料和琥珀酰胺酸添加剂;
(15)氢化脂肪仲胺类;
(16)N,N-二烷基脂肪胺和羟基羟酸;
(17)羊毛脂。

1.4 抗氧化剂

液体烃类燃料在使用和贮存中,尤其是处在受热和氧化条件下,容易发生氧化变质。形成的氧化产物具有酸性,并能腐蚀与之接触的金属表面。在许多情况下,氧化也能引起粘度变大,使燃油中的有机组成性质发生变化。在燃油中加入抗氧化添加剂可有效地缓解氧化作用。用作抗氧化剂的有:
(1)受阻酚和氨基化合物;
(2)二(杂环氮)取代二芳基烷烃;
(3)环已胺;

（4）六氢化嘧啶；
（5）芳基胺类和 1-正丁氧基-1（1-萘氧基）乙烷；
（6）二聚酸的混合物。

1.5 腐蚀抑制剂（缓蚀剂）

在使用和贮存燃料时，通常要与黑色金属接触并对黑色金属产生腐蚀。腐蚀抑制剂的作用是保护内燃机、管路及贮油容器等的金属表面不受腐蚀。属于这类添加剂的有：
（1）二聚酸烷基酚烷基羧酸铵盐；
（2）乙氧基化烷基酚和咪唑啉化合物；
（3）碳酸胍；
（4）N，N-双基取代胺的羧酸盐；
（5）热不稳定的丙二酸盐-酯；
（6）烷撑胺-甲酸的反应产物；
（7）醇基酰胺和双羧酸；
（8）烯烃与硫代膦的反应产物；
（9）酚盐-卤代羧酸的缩合产物。
添加镁和硅的复合剂可防止铅腐蚀。

1.6 辛烷值改进剂和抗爆剂

下列各种添加剂可作为辛烷值改进剂和抗爆剂：
（1）甲基酚和甲基甲氧基丙烷；
（2）无水异丙醇混合物；
（3）锰、柠檬酸酯和烷基锡化合物；
（4）N，N-双基取代二硒氨基甲酸酯；
（5）甘油醋酸酯；
（6）二乙基乙氧基甲基丙二酸酯；
（7）甲基三羧酸酯；
（8）三氟甲苯。

1.7 提高燃烧效率的添加剂

可作为这类添加剂的有：
（1）二叔丁基过氧化物；
（2）硝基烷烃和合成酯类润滑油；
（3）沥青煤（烟煤）、溶剂和碳化物；
（4）醇-水混合物；
（5）氢气。
当用氢气为添加剂时，需将氢气以脉冲气流注入液态烃燃料中，使氢气被分散或被包在液态烃燃料内。为此，燃料的相对密度应保持在 0.75 左右为宜。如偏离此值较大，则可预先将燃料和另一种相对密度适当的可燃液体混合，以便获得所需相对密度的液体燃料。

1.8 控制燃料润滑能力的添加剂

这类添加剂可以抑制汽油对进气总管的湿润作用并对空气-燃料的混合气在多缸发动机的各缸内的分布有好处。属于这类添加剂的有:

(1)含磷和硫过氧化物;

(2)含氟聚合物。

1.9 抗静电剂

加入抗静电添加剂后，燃油的导电率明显地增加(随时间而增加)。添加剂的添加量很少，一般为2～40 ppm。用以作为抗静电剂的有:

(1)聚砜共聚物;

(2)水杨酸金属络合物。

1.10 抗微生物剂

抗微生物添加剂可有效地抑制微生物在含水的烃类燃料中生长。由于船舶中的各种油舱或油柜中，水不可避免地会通过各种途径进入。于是诸如分枝芽胞菌橡胶这类微生物，就会在油水介面处生长，形成粘质物。如不除去，会堵塞过滤器和设备。加入少量抗微生物剂是必要的。用以作为抗微生物剂的有:

(1)席氏碱类 (Schiff Bases);

(2)1-羟基-3 H-1,2-苯并氧杂硼;

(3)有机硼化合物;

(4)六氢-1,3,5-三氮杂苯;

(5)1,10-二氮杂菲。

1.11 其它类型添加剂

1.11.1 燃气轮机用硅和镁化合物

对于不加添加剂的燃气轮机燃料，其钠和钒的含量不得大于2 ppm，否则会产生严重的高温腐蚀。但如加入硅和镁化合物组成的添加剂后，则可使钠的允许含量高达20 ppm。

作为添加剂中镁和镁组分的来源，可以用水溶性硫酸镁、醋酸镁和氯化镁；也可以采用不溶于水的氢氧化镁、氧化镁和碳酸镁(但必须是用分散的或磨碎的形式)。其它含镁的物质或化合物，如滑石或镁白土，天然或合成硅酸镁也可以用，这些可同时供给镁和硅。

作为添加剂中硅的来源，可使用磨碎的或胶体状态的硅，也可以用磨碎的无机硅酸盐类。有机含硅化合物特别有用，尤其是硅酮，聚硅酮，轻烃基$C_{1\sim6}$硅酸酯(例如四碳以下轻烃基正硅酸酯)，混合烃基聚硅酸酯 (例如乙基聚硅酸酯) 等。

添加剂可在燃烧前加入燃料中，也可在燃烧过程中直接引入火焰或燃烧气体中。

1.11.2 燃气轮机用的硫蚀抑制剂

这种抑制剂是氧化铬和氧化锰的混合物，含有可溶性铬化合物和可溶性锰化合物溶液的燃烧产物，它可以抑制对金属表面的热硫化腐蚀和改变沉积物的性质 (使沉积物变得能自行剥落，更脆，完全无粘着性和较易于用一般的物理清扫方法清除掉)。这些对燃气轮机的运行性能、效率、运行寿命、维修以及可靠性等方面均有很多好处。

添加剂可直接加入燃料内，并使金属表面暴露于燃烧气流中，也可以将水溶液的添加剂注入直接对着金属表面的烟气流中。

1.11.3 残炭抑制剂

将卤代聚烯（卤代聚丙烯或卤代聚丁烯）作为添加剂加入燃料中，可以减轻燃料生成残炭的倾向。试验表明，根据添加剂的加入量的不同，残炭的减少量约为6%～47%。

1.11.4 日光曝晒下生成淤渣的抑制剂

石油馏分燃料处于紫外线照射下，一般有变得混浊，产生淤渣的倾向。如在燃料中加入很少量的长链一羧酸或二羧酸的酯类和由尿素或硫脲与烃醇胺缩合而得的含氮聚烃基醇，可有效地抑制这种不利的变质。

1.11.5 固体润滑剂

这种固体润滑剂由多种金属与高润滑性的盐类结合组成，制成小片。当将小片加入内燃机的燃油箱后，小片会缓慢碎裂成为极微小的固体颗粒，分散在燃油中，传送到与燃油接触的内燃机部件上，沉积成一层润滑膜，从而使运动部件间的摩擦系数减小，降低油耗和延长发动机的使用寿命。

2 商业燃油添加剂

目前，作为商品在实际使用的燃油添加剂往往是多效能的综合性添加剂。如“德鲁”公司（Drew Ameroid Marine）和“碧浪灵”公司（Perolin Marine Aunitor Company）的一些燃油添加剂即属此类。

2.1 “奥妙能”FOT燃油处理剂（Ameroid FOT fuel oil treatment）

2.1.1 特点和功能

FOT燃油处理剂含有燃油净洁剂及乳化剂等，专门用以解决重质燃料油的处理和燃烧上的众多问题。它既是一种燃油处理剂，也是一种溶剂。

FOT燃油处理剂同时具有污渣消散剂、水乳化剂、油清洁剂等多种功能，能协助消除燃油输送系统装置上聚集的水气、碳化氢、过多的污渣以及碳化沉积物，能使燃油的流动更为稳定和均匀，从而改善雾化质量，使火焰更为稳定，燃烧得更好。

作为一种溶剂，FOT燃油处理剂能保证快速、有效地清洗碳化沉积物，熔干渣质、油漆、树胶沉积物以及来自各种船用石油产品中的蜡质残渣等。

2.1.2 主要特征

成分：为一种高效率溶剂、润湿剂及乳化剂等综合性油质化学品；

外观：红色的纯洁溶液；

闪点：75℃；

相对密度：1.123。

应该特别注意，FOT燃油处理剂是一种刺激剂，不能直接接触人体，也应避免吸入其气体。

2.1.3 使用

1)使用方法

如用以作处理剂时，将FOT处理剂加入油舱中，可使整个系统起作用，收效最大。加入油舱的方法有两种：

（1）用泵将FOT直接打入油舱内。如用此法时，最好是在即将加油之前泵入。这样，可借助燃油的扰动，使FOT处理剂混合均匀；

（2）为确保处理剂的消散作用，最好将FOT计量加入加油管路内。但用此法则需有一套专用的泵和进料箱。

在柴油机船上，建议将FOT加入日用油柜内，因为其乳化剂能分担净油机的功能。

添加量：建议用量为 8 t燃油加FOT燃油处理剂 1 L。

如用以作溶剂时，FOT可用于以下两个方面：

（1）清洁整套燃油器具、燃油加热器、过滤器以及滑油冷却器等；

（2）清除双层底及深舱内的严重污渣沉积。

当作为溶解清洁剂用于清洁整件器具和设备时，建议遵守下列各项规定：

（1）容器的大小应足够，以保证需清洁的器具或设备能全部浸入FOT中，而其最低部又需离容器底部 75～100 mm，以便可以沉积碳渣；

（2）需清洁的器具或设备中的剩油应除去；

（3）将器具或设备垂直地浸沉在FOT内，浸沉时间至少 2 h。因FOT对金属无损害作用，浸沉时间愈长愈佳，或等需要时才取出；

（4）当需要时，将器具或设备从容器内取出，并等候几秒钟，使FOT流掉；

（5）当溶剂的效用完全失去时，可将FOT放入沉淀油柜或回油柜内，作为油柜清洁和清除污渣之用。

当作为污泵清除剂使用时，可用煤油将FOT稀释（3份煤油，1份FOT），使之成为一种强力而又价廉的良好溶剂，用于清除双层底和深舱内的严重油渣和沉积物。稀释作用，可提高FOT的活动性，使之与油渣完全接触。

建议采用以下的操作规程和方法：

（1）将油舱泵进压舱水，加入FOT，再加热和摇动，可使清除油渣的工作加速完成。

（2）如燃油舱有压舱水，则在压舱水被全部打出船外以前，最好是打至一半时加热。

（3）在加油之前，先加FOT溶液，可以将任何剩余油渣，悬浮在燃油内，而不时的扰动，则可使处理剂充分扩散。

（4）如燃油舱内存在过多的油渣，则可将油泵出至油渣液面，然后向油舱加入FOT（添加剂，它与油渣容积之比为 1/35），并加热，同时将各舱间业经处理的油渣来回循环驳送，直到油渣成为均匀的流体为止。

2)使用中的注意事项

（1）不要使FOT燃油处理剂沾及眼睛，皮肤或衣服，避免吸入其气体；

（2）在处理FOT时，应选择通风良好处，并戴上护目镜及橡皮手套。使用后，应彻底清洗。

（3）如有接触，立即用大量清水冲洗眼睛或皮肤，最少要洗 15 min。如触及眼睛，应送医院。

（4）如不慎吞服，应立即喝温肥皂水或温芥末水，诱导呕吐，并立即送医院。

（5）如吸入其气体过多，应立即移至空气新鲜处，并送医诊治；如呼吸困难，应立即输氧气。

2.2 “奥妙能”燃油消散剂（Bunkersol-DTM）

2.2.1 特点和功用

“奥妙能”燃油消散剂是一种高效能溶剂、表面剂及清洁剂的混合物，可以防止及减少柴油机船燃油系统中淤渣的形成，特别适用于油舱中沉积物的溶解及消散。使用燃油消散剂不仅可保证燃油系统的正常工作，而且可以减少清洗油舱。

2.2.2 主要特性

外观：清洁的蓝色溶液。

挥发点：55℃。

相对密度：1.123。

本添加剂为含有芳香烃及氯的溶剂。吞食有害；吸入其蒸发气体可导致麻醉及麻痹现象；与皮肤眼睛接触，可造成刺激性过敏。

2.2.3 使用

1)使用方法

燃油消散剂最好在加油前直接加入油舱内，借助其自行消散的特性，产生显著的效益；也可以在燃油管路中加入。

当用于溶解及消散油舱底部较厚淤渣时，开始阶段需特别注意过滤系统，直至这些大量的淤渣被清除为止。这个阶段通常需 2～3 天。

添加量：一般为燃油的 1/6000～1/10000，而最初添加量以燃油的 1/8000 为宜。在使用中可根据具体情况调整其用量。

2)使用中的注意事项

(1)不要吞食，避免长时间的吸入其蒸发气体。不要沾及皮肤、眼睛。

(2)使用时戴安全护目镜及橡皮手套，保持良好的通风；使用后彻底清洗护具。

(3)如果误食，应服用温肥皂水及温芥末水，诱导呕吐，必要时送医诊治。

(4)如触及皮肤，得用水及肥皂清洗 15 min；如触及眼睛，用水清洗 15 min，必要时送医诊治。

(5)如吸入气体过多，应使患者立即呼吸新鲜空气；如患者呼吸困难，则输氧，并立即送医院。

(6)本剂应贮存在密封的钢桶中，需远离热源及火焰。如着火，可用干性化学剂或二氧化碳扑灭。如不慎泼溅，尽可能用吸收性好的物质（如破布、锯屑等）吸干，然后用水冲洗。

2.3 “奥妙能”二号燃烧增进剂（Ameroid Mark II）

2.3.1 特点和功用

“奥妙能”二号燃烧增进剂是一种以特别配方调制而成的处理剂，主要用于改善低速船用柴油机的燃油燃烧。

使用二号燃烧增进剂时的特点是：

(1)能保持喷油嘴的清洁。该剂促进燃烧，消除了未经燃烧的燃油所积成的干硬渣垢。

(2)使油水分离情况更佳。该剂内所含特种防乳化剂，有助于分油机器和沉淀油柜内油和水分的分离。

(3)能保持燃油管路的清洁。该剂具有极佳的清洁能力，能使燃油中的污渣和沥青等浮

起，以免粘附于油柜和管路上。

（4）能使排气口的积垢松散。该剂能防止排气口沉积污垢，亦能使较小的积垢，随排气排出。

（5）该剂能与燃油彻底混合，不会与油分离，亦不会溶解于水而逸出。

2.3.2 主要特性

成分：系由有机金属化合物、消散剂、稳定剂及防乳化剂等组合而成，高碱性，能完全溶于重质燃油中；

相对密度：0.96；

外观：深棕色清净液体；

溶解性：可溶于任何比例的燃油内；

闪点：71℃；

凝点：－20℃。

2.3.3 使用

1)使用方法

二号燃烧增进剂可在加油前先加入双层底油舱内，亦可在分油机前按添加量用专用泵注入。

添加量：一般情况下，再4 t燃油加添加剂1 L。当燃油中钒、钠及硫的含量高时，则应根据具体情况调整添加量。

2)使用中注意事项

同FOT燃油处理剂，参阅本章2.1.3.1。

2.4 燃烧效率增进剂/沉积物缓和剂（Amergize Combustion Improver/Modifier)

2.4.1 特点和功用

AMERGIZE 燃烧效率增进剂/沉积物缓和剂是由多种油溶性的有机金属化合物集中混合而成。中、低速柴油机在使用重质燃油时，这些有机金属化合物具有减少燃烧后渣质的形成和促进完全燃烧的功效。

AMERGIZE 添加剂适用于处理中、低速柴油机中所发生的燃烧不完全问题及由于燃油中含钒、钠、硫等所导致的高温腐蚀和低温腐蚀问题。其工作特点是：

（1）藉助于提高钒的氧化物的熔点，而使其不附着于及不腐蚀高温面层。

（2）藉助改变碳渣晶体的结构和硬度，使其成为可燃性及减轻灰化而易于排出。

（3）钝化钒的活泼性，使其不能成为将SO_2变成SO_3的催化剂，从而使硫产生的腐蚀减至最小。

（4）利用添加剂本身的碱性，中和燃油的酸性。

（5）降低燃油的燃点，使燃烧彻底。

2.4.2 主要特性

相对密度：0.928；

外观：棕色清净液体；

溶解性：能以任何比例溶于油中；

闪点：65℃；

凝点：－42℃。

2.4.3 使用

添加量：1～8 t燃油加添加剂1 L。须根据燃油中杂质的含量、发动机的设计及运转等具体情况而定。

添加剂必须与燃油混合均匀以便发挥其最大功能。可加入日用油柜中，也可通过专用泵加入燃油管路中。

2.5 “碧浪灵”655 RN燃油添加剂

2.5.1 特点与功用

655RN燃油添加剂含有有机金属触媒剂，是一种多效能的添加剂。它不仅可以在燃烧时抑制SO_3的生成，而且能改善燃烧特性，减少过量空气，从而使SO_2转变为SO_3的情况显著减少。因此，655RN添加剂具有减少低温腐蚀的效能。与此同时，655RN添加剂可以降低碳的着火温度，改善燃烧过程，从而使游离碳的数量减少。因而，它又具有减少炭灰沉积物的功能。

655RN添加剂主要用于锅炉的燃油系统中。

2.5.2 使用

最有效和经济的添加方法是：用一能计量的专用泵将添加剂泵入尽可能靠近燃油泵的燃油管路中。

如不能用上述方法添加，则可将添加剂直接加入日用油柜中。但此时添加量需增加10%。

添加量：根据具体情况可分为较少、中等、较多，最多等不同的添加比例，如表2.2.6-1所示。

表2.2.6-1 655RN添加剂的添加量

添加浓度	作抑制低温腐蚀剂	作抑制碳灰沉积剂
较少	1∶6000	1∶6000
中等	1∶5000	1∶5500
较多	1∶4000	1∶4000
最多		1∶3000

2.6 “碧浪灵”683DF复合燃油处理剂（Combined FOT 683DF）

2.6.1 特点与功用

683DF添加剂是一种多功能的燃油添加剂。它含有燃烧催化剂和灰分缓和剂等多种成分，适用范围较广，除了因微生物引起的燃油系统腐蚀和燃油中钒、钠含量特别高所导致的排气系统过度腐蚀等问题外，其它大多数的因燃油和燃烧所引起的问题均可借助添加683DF添加剂得到解决或缓解，这些问题包括：

（1）淤渣沉积和高温腐蚀；

（2）低温腐蚀；

（3）烟气和烟灰的排放；

（4）碳基灰分沉积物（包括增压器污堵）；

（5）焦油状碳垢；

（6）排气阀的高温腐蚀；

（7）一般的功率降低。

2.6.2 主要特性

外观：深红棕色液体；

密度(15℃时)：0.870 g/cm³；

闪点：68℃；

可溶于所有的燃油中。

2.6.3 使用

1)使用方法

最有效和经济的方法是：通过一台能计量的专用泵将683DF添加剂泵入尽可能靠近燃油泵的燃油管路中。如此法不能实施，也可将添加剂直接加入日用油柜中。

添加量：视问题的性质和程度的不同而定。添加比例的一般范围为 1/2000～1/4000。

2)使用中注意事项

(1)应存放于远离食物且通风良好之处。

(2)如有泄漏，要防止进入水系，应用乳化清洁剂清洗或用干的砂土将其吸收。

(3)要避免和皮肤、眼睛接触与吸入其气味。如触及眼或吸入其气体，则应就医。

(4)应按石油产品的安全要求进行安全处理。

2.7 "碧浪灵"667ND添加剂 (Carbon Catalyst 667ND)

2.7.1 特点和功用

"碧浪灵"667ND添加剂主要是一种高度浓缩的燃烧促进剂。它适合于柴油机或锅炉在使用重油（燃料油）或渣油时加入燃油系统。

667ND添加剂的主要功用是：

(1)减少和抑制炭垢与炭烟；

(2)减少低温酸性腐蚀（抑制SO_3的形成）；

(3)减少淤渣的形成；

(4)促进燃烧，提高功率。

2.7.2 主要特性

成分：含有机金属催化剂，为一种刺激剂；

外观：深红棕色液体；

密度(15℃时)：0.885 g/cm³；

闪点：71℃；

可溶于所有的燃油中。

2.7.3 使用

1)使用方法

最有效和最经济的添加方法是：通过一个专用的计量泵将添加剂泵入尽可能靠近燃油泵的燃油管路中。如无条件用此法，则可将添加剂直接加入日用油柜中，但此时添加量应增加10%。

添加量：1/6000～1/12000。应按各具体问题的性质和程度而定。也可查阅"碧浪灵"公司的有关燃油的处理手册，或根据该公司有关人员的建议。

2)使用中注意事项

同683DF添加剂。参阅本章 2.6.3.2。

2.8 “碧浪灵”622DE燃油调节剂（Fuel Conditioner 622DE）

2.8.1 特点和功用

“碧浪灵”622DE添加剂是一种可溶于油、具有中和性能和自扩散性能的燃油添加剂。它主要用于解决燃油在燃烧前的一些问题。

622DE添加剂的主要功用是：

（1）溶解和消散作用。使淤渣消散，改善稳定性和燃油的雾化以及燃烧效率。

（2）抗聚合作用，抑制沥青淤渣的形成。

（3）破坏油水的乳化，使油和水分离，提高分油机的效率。解决油中含水的问题。

（4）减少和抑制油柜和燃油管路的腐蚀。

（5）中和燃油氧化所生成的酸和抑制微生物的含量。

2.8.2 主要特性

外观：深棕色液体；

密度（15℃时）：1.025 g/cm³；

闪点：74℃；

可溶于任何油中。

2.8.3 使用

1)使用方法

622DE添加剂应用于整个燃油系统的处理。最好的添加方式是：将所需量的添加剂在加油前通过测量管加入油舱。加油时的扰动可保证添加剂与燃油完全混合。

添加量：1/500～1/5000，视需解决的各具体问题的性质和程度而定。

2)使用中注意事项

同683DF添加剂。参阅本章2.6.3.2。

2.9 “碧浪灵”687SD灰分改良剂（Ash Modifier 687 SD）

2.9.1 特点和功用

687SD添加剂的主要作用是改良燃油的灰分，将燃油灰分的燃结温度和熔点提高到发动机正常工作温度以上，从而减少高温腐蚀。其主要效果为：

（1）改良燃油灰分；

（2）减少气阀和阀座上的灰分沉积物；

（3）减少熔盐腐蚀；

（4）减少增压器的污阻和腐蚀；

（5）使排气系统的维护更方便、简易。

687SD添加剂适用于二冲程或四冲程柴油机使用重油（渣油）时，特别适用高增压中速柴油。

2.9.2 主要特性

外观：橙色清净液体；

密度（15℃时）：0.890 g/cm³；

闪点：65℃；

可溶于任何油中。

2.9.3 使用方法

最有效和最经济的添加方法是：通过一个专用的计量泵将添加剂泵入尽可能靠近燃油泵的燃油管路中。如无条件用此法，则可将添加剂直接加入日用油柜中，但此时添加量应增加10%。

添加量：1/2500～1/6000，按各具体问题的性质和程度而定。

使用中注意事项：

同683DF添加剂。参阅本章 2.6.3.2。

2.10 “碧浪灵”Formet 350添加剂

2.10.1 特点与功用

Formet 350 添加剂是一种防止燃油系统腐蚀的添加剂。一般的防腐蚀可用622DE添加剂，但如系统明显地出现生物污染所导致的腐蚀，则必须用Formet 350 添加剂代替或补充622DE添加剂。Formet 350 添加剂能杀死微生物并防止系统进一步被污染与腐蚀。

2.10.2 使用

使用Formet 350 添加剂的方法基本上与622DE添加剂相同，但其添加量为 1/5000。

第 7 章　燃料的安全与贮用

1　防火防爆

1.1　燃料的燃烧与爆炸

石油产品都是可燃物质，轻质燃油更为易燃、易爆物。在石油产品的贮运与使用过程中，要十分注意防火、防爆的问题。油品又都具有蒸发性，蒸发出的蒸气和空气混合成为混合气体，混合气体遇到火源就会发生氧化反应。一般速度氧化为燃烧，强烈的氧化反应为爆炸。氧化反应的速度取决于混合气体中油蒸气的浓度。当油蒸气浓度达到一定范围时才能闪火爆炸，这一浓度范围就称为爆炸范围。油蒸气浓度达到爆炸范围最低浓度时，称为爆炸下限；达到爆炸范围最高浓度时，则称为爆炸上限。油蒸气浓度高于爆炸上限或低于爆炸下限时，都不产生爆炸，只产生燃烧。因此，闪点实际是油品受热产生油蒸气浓度达到爆炸下限时的温度，即是加热油品产生混合气，遇到火种时，发生迅速氧化的最低温度。一般用闪点来区分油品的易燃性。

（1）在国外一般以闪点（闭口）40℃为划分界限，高于 40℃者为非易燃易爆危险品，低于 40℃者为易燃易爆危险品。

（2）我国交通部有关安全管理规则规定石油产品分为三级。

一级为闪点在 28℃以下的油品，如苯、汽油、石脑油和某些原油。

二级为闪点在 28℃～6℃的油品，如煤油和某些原油。

三级为闪点在 60℃以上的油品，如柴油、燃料油、润滑油等。

当三级石油产品加温到该油品的闪点温度时，或者三级油品装载于有可燃气体的油舱时，应按一、二级石油看待．并采取同样的防范措施。

（3）国内外船舶建造规范规定船舶使用燃料闪点（闭口）不得低于 60℃，应急装置的燃料闪点（闭口）允许不低于 43℃。如船舶特殊需要用闪点更低的燃料时，要设有特殊的设备，并且要征得验船部门的同意。

（4）船舶进厂修理时，各燃油舱柜必须进行爆炸体的检测，以防由于油舱柜爆炸气体的浓度较大而导致明火作业时产生爆炸。测爆标准见表 2.2.7-1。

表 2.2.7-1　**修船中，检测爆炸气体的标准**

序　号	物质名称	蒸气密度	闪　点	自燃点	爆炸下限	爆炸下限的 1/100	明火作业标准
			℃	℃	%	ppm	ppm
1	氢	0.07	气体	560	4	400	80
2	乙炔	0.90	气体	305	1.53	153	30
3	一氧化碳	0.96	气体	644	12.50	1250	250
4	乙烯	0.97	气体	425	2.75	275	51
5	甲醇	1.11	−1～+32	430	3.50	350	70
6	乙醇	1.59	9～32	421	2.60	260	52
7	丙醇	2.20	22—45	377	2.55	255	51

续上表

序　　号	物质名称	蒸气密度	闪　　点	自燃点	爆炸下限	爆炸下限的 1/100	明火作业标准
			℃	℃	%	ppm	ppm
8	丁醇	2.56	27～34	337	1.70	170	34
9	汽油	3.51	−58	415	1.00	100	20
10	煤油		28	380	1.10	110	20
11	苯	2.72	−15−10	555	1.30	130	22
12	甲苯	3.22	6—30	535	1.00	100	20
13	二甲苯	3.66	29	590	1.00	100	20
14	苯乙烯	0.91			1.10	110	22
15	丙酮	2.00	−20	537	1.60	160	32
16	乙醚	2.60	−41～20	170	1.20	120	24
17	硫化氢	1.19	气体	246	4.30	430	86
18	甲烷	0.55	气体	650	2.50	250	50
19	乙烷	1.04	33	510	3.22	322	64
20	丙烷	1.56	97	466.6	2.37	237	47

注：我国规定：明火等热工作业在爆炸下限（容积）1%或以下，具体使用中采用下限的1%值的1/5左右为明火作业的测爆标准。

1.2　防火、防爆的措施

1)操作方面

(1)在机舱中禁止吸烟。

(2)倾倒油品和敞开容器、贮存油品等工作，必须在环境温度低于油品闪点17℃的情况下进行。

(3)燃油的舱柜与大气相通时，加热温度应低于闪点15℃。

(4)燃油加温时，发现有下列情况之一者，应停止加温：

①加温管露出油面；

②加温管漏气；

③蒸气阀门漏气；

(5)燃油管系严禁跑冒滴油，尤其要防止燃油接触高温设备（排气管等）。

(6)机舱装油与驳油要指定专人看管，以防溢油。

(7)当燃油管系及设备发生冻结情况时，严禁用明火烘烤。

(8)机舱进行明火作业，必须按规定进行申请，待批准后才能进行工作，工作时必须严守操作规程

(9)柴油机及时作好清洁、检查、维修工作，避免产生柴油机的曲轴箱爆炸与扫气箱失火。如果出现上述情况，必须按照操作规程正确处理，以免事态扩大。

(10)柴油机锅炉等燃油设备使用时，要遵守操作规程。

(11)船舶进厂进行修理时，有关燃油舱柜应进行清洁、防爆，合格者方允许进厂。

(12)油棉纱与布片等易燃物及某些自燃物，要集中在加盖的容器中保管，并及时处理掉。

(13)机舱舱底下的浮油要及时处理。

2)设备方面

（1）燃油舱柜的透气管端如与大气相通，其管端需装有金属安全网，以防火星杂物落入。

（2）禁止用塑料管玻璃管等可熔或易碎材料作油柜的液位表。

（3）日用燃油柜应装设可在机舱外控制的速闭阀。

（4）加热盘管要用钢管制造，并且不能有任何可拆的接头。

（5）燃油柜内应装有溢流管，以防燃油溢出。

（6）加热燃油的蒸汽的凝水管，应装有凝水检查器，以检查加热管的漏泄情况。

（7）油舱内的加热管的最高点在海船上须低于油舱内剩余油面的250 mm，在内河船上则不应超过双层底高度的25%。

（8）在表面温度较高或可能产生火花的设备上面，不能设置油柜。

（9）不可用塑料管等材料作输送燃油的管道。

（10）机舱要按规定设置消防器材，并且使这些器材处于良好技术状态之下。

2 防毒

2.1 燃料的毒性

（1）含四乙基铅的汽油毒性很大。空气中铅浓度达到0.00001 mg/l时，人就会中毒。汽油很易蒸发，蒸发时使四乙基铅散入空气中，导致人吸入中毒。此外，含铅汽油如接触皮肤或溅入眼睛，也会损坏人体。

（2）许多石油产品对人体有害，接触皮肤如不清洗干净有可能引起皮炎，严重的会发生皮疹或皮瘤。如果误入口内或吸入体内，轻者发生肠胃病或肺炎，重者可能导致癌症。

2.2 防毒的要求

（1）机舱泵房应通风良好。

（2）进入油舱内部工作时，事前尽可能采取降温措施，通风、排除油气，必要时应戴防毒面具。

（3）燃油系统等设备应经常保持严密不漏，如发现泄漏时，应及时检修（注意防火安全）。渗漏出来的油应及时采取适当的处理措施。

（4）由污油水中分出的废水应达到国家排放标准后才能排放，以免污染环境。

（5）加强防毒宣传，使船员普遍懂得防毒知识。

（6）清洗油柜必须按照操作规程进行。

（7）禁止用嘴吸取油料。

（8）禁止用含铅汽油洗手和洗机械零件。

（9）油料触及皮肤，要及时清洗干净。

（10）禁止食品触及油料。

3 防静电

3.1 燃料产生静电的原因及其危害性

在泵送燃料时，燃料与管壁、阀门、滤器等设备的摩擦，燃料与空气的摩擦都能产生静

电。而燃料的导电性能又很差，因而产生并积聚了大量的静电荷，其电势可达上万伏。

影响静电产生和积聚的因素如下：

1)燃油的电导率

烃类燃料是电的绝缘介质，电导率都很低。燃料越纯净，其电导率就越低。当燃料中含有水分或杂质后，其电导率增大。当燃料中加入金属盐或其他极性物质后，电导率也增大。电导率低的燃料在相同条件下静电荷消失很慢，因而积聚很快；反之，静电荷消失速度很快，电荷不易积聚。

2)大气湿度

空气的湿度对燃料中静电荷的积聚也有很大影响。湿度越大，空气的导电性越好，产生的静电荷越不易积聚。因而静电起火往往发生在气候比较干燥的时候。

3)燃料流动的影响

流速与流量越大，产生的静电荷越多，电压越高。燃料在空气中流动，比在管道内流动产生的静电多。

4)过滤器的过滤介质

在燃料流动过程中，过滤器的过滤介质对产生静电的影响最为明显。由于通过过滤介质，使油流过的表面大大增加(摩擦表面增大)，从而产生大量的静电荷。所以，过滤介质是影响燃料在流动过程中产生静电的主要因素，即使是细密的铜丝网一类导电性极好的过滤介质，也能产生大量的静电。

液体燃料静电着火取决于以下两个方面：

1)静电放电的能量

在燃油系统中一切带有电位差的两种物体互相接近到适当距离时，就会产生静电放电——发生火花的现象。火花是否能点燃周围可燃混合气体，还要决定于火花具有的能量。若火花能量低于 0.25 mJ，则不能点燃。

2)燃料蒸气的着火浓度和温度

燃料的着火浓度是指燃料和空气混合后能被火点燃的浓度。不同燃料有不同的着火浓度。该浓度又取决于燃料的温度，因为燃料在某一温度下，有其对应的蒸气压力，这时形成混合气浓度刚好达到可点燃界限；若低于此温度时，混合气浓度尚不足以成为可燃气体，这个温度称为着火温度下限。若温度增高，混合气中燃油蒸气浓度增大到混合气尚能保持可燃烧的最高温度，称为着火温度的上限。若温度再升高，由于混合气过浓，反而成为不可燃烧的气体。不同燃料有不同的着火温度上下限。

3.2 防止静电的措施

1)改善操作方法

(1)避免燃油在空气悬空流动。

(2)避免燃油流动速度过大。

(3)经常保持接地装置良好的技术状态。

(4)在干燥、高温的气候下装油要特别注意。尽量放慢装油速度，加强检查接地设备。

(5)在装油开始阶段与装至容器 3/4 高度时，易产生静电火花，应放慢装油速度。

(6)油管出口处严禁加油。

2)改装燃油系统的设备

(1)装接地线必须有良好的导电性能，有适当的截面积和足够的强度。

(2)装油管、回油管应在油面下有足够的插入深度。

(3)适当增加在过滤器后面的输油管长度。

(4)尽量减少燃油舱柜的自由液面。

尽管重质燃油比轻质燃油含有水分多、杂质多、电导率高、不易蒸发、静电起火的可能性少一些，但不可麻痹大意，掉以轻心。

第3篇　船用润滑剂

第1章　概　　述

使用润滑剂的主要目的是为了把两个相对运动体的工作表面完全隔开，使静摩擦和动摩擦减少到最低限度，以防止磨损。此外，它还起到或部分起到下列作用：（1）带走轴承内产生的热量或由外界来的热量；（2）保护金属免遭腐蚀；（3）冲洗污染物并使污染物分散悬浮；（4）减弱噪声；（5）密封金属表面；（6）传递动力。

由于国际上供应的燃油质量越来越差，在航运市场竞争激烈的条件下，润滑剂的使用既要符合机器设备的要求，又要尽量减少费用开支。

1　船舶机械设备所用的润滑剂

表 2.3.1-1 为船舶各种机械设备所用的润滑剂。

表 2.3.1-1　　船舶机械设备所用润滑剂

船舶机械设备名称		润滑部位	润滑剂
主机和辅机	低速柴油机	轴承，推力轴承，活塞冷却	含抗氧防锈剂柴油机油或低总碱值柴油机油
		气缸（烧燃料油）	气缸油（所用总碱值大小按燃油硫分选择）
		气缸（烧柴油）	低总碱值气缸油或高粘度（SAE等级≥40）柴油机油
		气缸（跑合用）	高粘度纯矿物润滑油或低总碱值柴油机油
		废气涡轮增压器（独立润滑）	汽轮机油
		废气涡轮增压器（与轴承同一润滑系统）	与轴承用油同
		活塞冷却水	乳化防锈油
		调速器（液压作用式）	液压油或汽轮机油
		液压排气阀传动系统	与轴承用油同气缸油
		液压排气阀杆	气缸油
	中、高速柴油机	轴承和气缸	筒状活塞柴油机油（所用总碱值和粘度等级按燃油品种、硫分而定）
		废气涡轮增压器（独立润滑）	汽轮机油
		废气涡轮增压器（与轴承同一润滑系统）	与轴承用油同
		调速器（液压作用式）	液压油或汽轮机油

续上表

船舶机械设备名称		润滑部位	润滑剂
主机和辅机	蒸汽轮机	轴承	汽轮机油
		减速齿轮箱	含极压添加剂汽轮机油
	闭式往复蒸汽机	轴承	汽轮机油
		汽缸	蒸汽气缸油
	开式往复蒸汽机	轴承	蒸汽机油
		汽缸	蒸汽气缸油
	转车机	齿轮箱	齿轮箱油
		开式齿轮	开式齿轮油
	可变螺距螺旋桨	液压系统	液压油或与主机轴承用油同
	中间轴	轴承	与主机轴承用油同
	尾轴管	铁梨木轴承	海水
		封闭式白合金轴承（SIMPLEX型）	与主机轴承用油同
		半开式白合金轴承（CADARVAL型）	尾轴油
		需加润滑脂部位	钙基脂或石墨钙基脂或锂基脂
辅助设备	蒸汽往复泵	气缸、活塞杆	蒸汽气缸油
	电动机、鼓风机、离心泵、往复泵	油润滑的轴承	与主机轴承用油同
		球轴承和滚子轴承（一般条件）	锂基脂
		球轴承和滚子轴承（高温条件）	钠基脂
		球轴承和滚子轴承（潮湿条件）	钙基脂
		球轴承和滚子轴承（接触石油产品）	特种脂
		齿轮箱	齿轮箱油或多用途柴油机油
	离心分油机	齿轮箱	齿轮箱油或多用途柴油机油
	空气压缩机（往复式）	轴承和气缸	柴油机油或压缩机油
	空气压缩机（回转式）	轴承	汽轮机油
	液化石油气压缩机	轴承和气缸	液化石油气压缩机油
	制冷压缩机	轴承和气缸	冷冻机油
	机床	齿轮箱和导轨	多用途柴油机油或含极压剂汽轮机油
	防摇鳍	液压系统	液压油
		鳍翼伸展导轨	尾轴油
	舱底阀液压控制系统	泵和系统	低温液压油
	水密门、天窗液压控制系统	泵和系统	液压油

续上表

	船舶机械设备名称	润滑部位	润滑剂
甲板机械	电动起锚机、起货机、绞缆机、吊杆升降机	封闭齿轮箱	齿轮箱油
		开式齿轮和钢丝绳	开式齿轮润滑剂
		加脂点	锂基脂
	液压起锚机、起货机、绞缆机、开舱盖机、跳板开闭机、平台升降机	油泵和系统	液压油
		封闭齿轮箱（独立润滑）	齿轮箱油、液压油
		开式齿轮和钢丝绳	开式齿轮润滑剂
	蒸汽起锚机、起货机、绞缆机	气缸、活塞杆	蒸汽汽缸油
		封闭齿轮箱	齿轮箱油、蒸汽汽缸油
	电动液压舵机	油泵和系统	液压油或柴油机油或汽轮机油
		操舵液压系统	液压油
		舵机杆加脂点	钙基脂
	远距离液压操纵系统	泵和系统	高粘度指数液压油
		各加脂点	锂基脂
		各开式齿轮和钢丝绳	开式齿轮润滑脂
应急设备	救生艇柴油机、应急空气压缩机、应急发电柴油机、应急消防泵	轴承和气缸	含稠化剂的多粘度等级柴油机油
		液压操纵系统	液压油
	备件保护		备件保护剂

2 润滑剂基础油

润滑剂可以认为是按特定要求调制的基础油和添加剂的混合物。是否达到预定要求，一方面取决于添加剂的性质，另一方面取决于基础油的质量、固有属性和跟添加剂配合的性能。各种基础油调配的润滑剂的主要性能比较见表 2.3.1-2。

表 2.3.1-2　　各种基础油的主要性能比较

矿物基础油	来源	从原油提炼而来
	主要性能	石蜡烃基础油：烃原子呈长链状，挥发性较小，化学稳定性较好，天然抗氧化能力较强，闪点、倾点较高，粘度指数较高。高温下会形成密集颗粒硬碳渣，氧化时会形成弱有机酸
		环氧烃基础油：烃原子呈环状，热稳定性较好，与添加剂配合较好，闪点、倾点和粘度指数均较低，燃烧时会形成较软和易碎的沉淀物，抗氧化能力较差，氧化时形成沉渣性沉淀物
合成基础油	来源	乙烯气体经催化形成液体α-烯烃，经合成作用成为聚烯烃，再加氢使其饱和而形成稳定的分子结构，用作基础油
	性能	粘度指数高，无蜡，化学稳定性和热稳定性好，不易挥发，能适应冷、热环境和高压的恶劣的工作环境

3　船用润滑剂的添加剂

3.1　添加剂的作用

添加剂是能改善润滑剂的某种性能和提高润滑剂的质量使其具有某些特殊性质的化学产品。

添加剂的作用是：

1)减少发动机部件上有害沉积物的形成和聚积。

2)中和酸性物质，减少其对设备的腐蚀。

3)防止设备及部件受到锈蚀。

4)减少设备及部件的摩擦和磨损，延长设备及部件的使用寿命。

5)使润滑剂的氧化和热分解延缓，延长其使用寿命。

6)改变润滑剂的物理性质，如：提高润滑油的粘度指数，以增高润滑油在高温时的粘度；降低润滑油的倾点，以改善其低温使用性能；减少泡沫形成等。

3.2　添加剂的种类

添加剂类别很多，每类又有不同的品种。调配润滑剂时，按要求放入不同的添加剂。放入的品种和比例由生产的厂家根据试验的结果而定。因而，不同厂家生产的同一种油所用的添加剂品种和比例都有所不同。

3.2.1　清净-分散添加剂（Detergents and Dispersants）

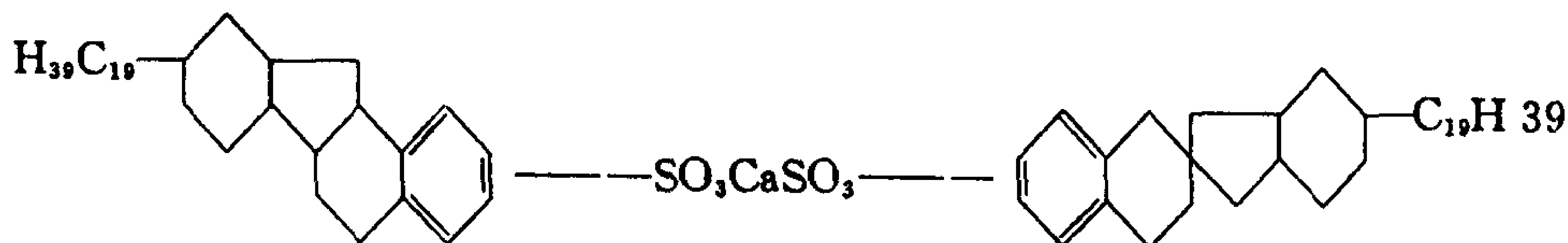
这类添加剂又叫做清净浮游添加剂。

漏过活塞环的燃气、燃油中的不完全燃烧产物和一部分润滑油的氧化产物，沉积在发动机部件上，形成碳渣、漆膜和曲柄箱沉渣。加在柴油机油和汽油机油中的这种添加剂，能将部件上的沉积物清洗到油中，以保持部件清洁，并把沉积物分散为极小的微粒，使其悬浮在油中，防止堵塞系统。这种添加剂具有碱性，既可以控制油因氧化而形成的腐蚀酸，又可中和进入曲柄箱燃烧产物的酸性，起到锈蚀抑制剂的作用。

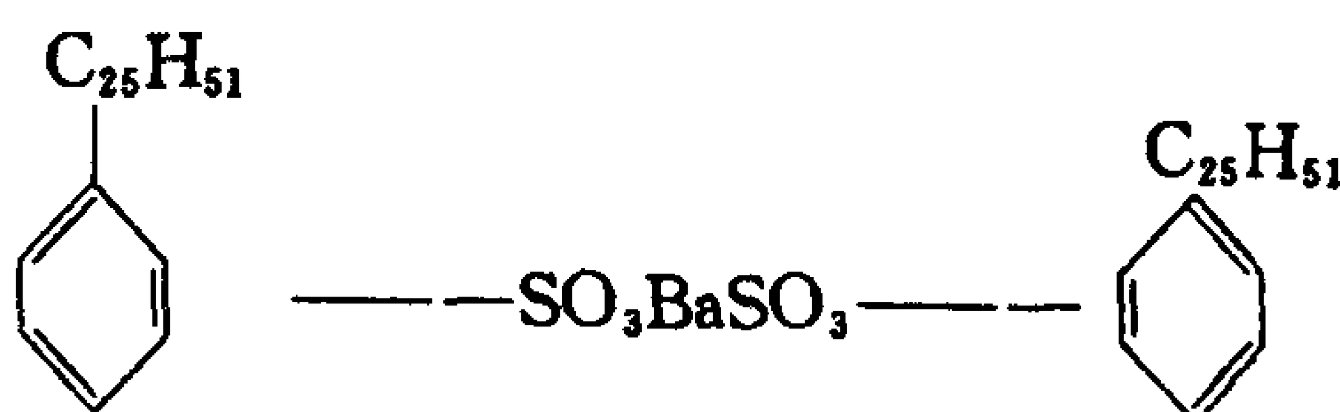
商业上的清净-分散添加剂有：

1)金属磺酸盐：

金属磺酸盐分子式为（$ARSO_2O$）M，其中M为钙、钡或镁，AR为天然或合成的石油磺酸，其结构是：



石油磺酸钙（天然）

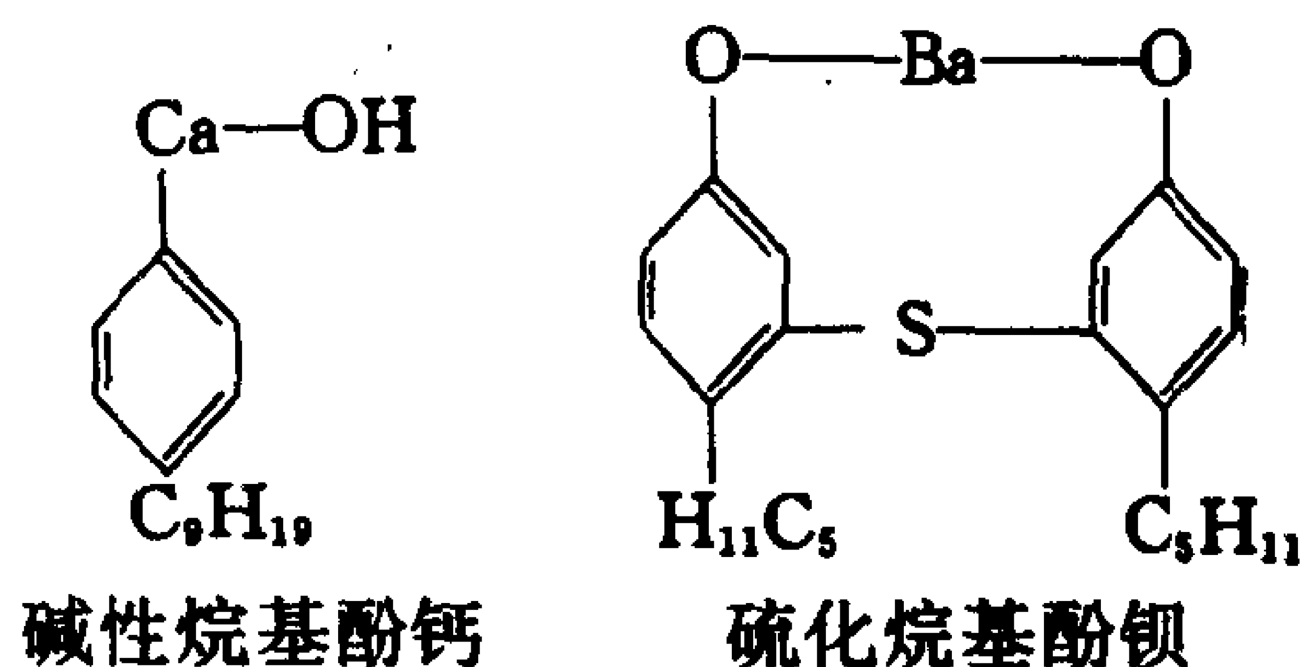


石油磺酸钡（合成）

金属磺酸盐使润滑油能控制高温沉积物的产生，并提供了分散性和热稳定性，还起到锈蚀抑制剂的作用。

2)金属烷基酚盐或金属硫化烷基酚盐

这种盐的金属通常是钡和钙。酚或硫化酚经烷基化后有了油溶性，其典型结构是：

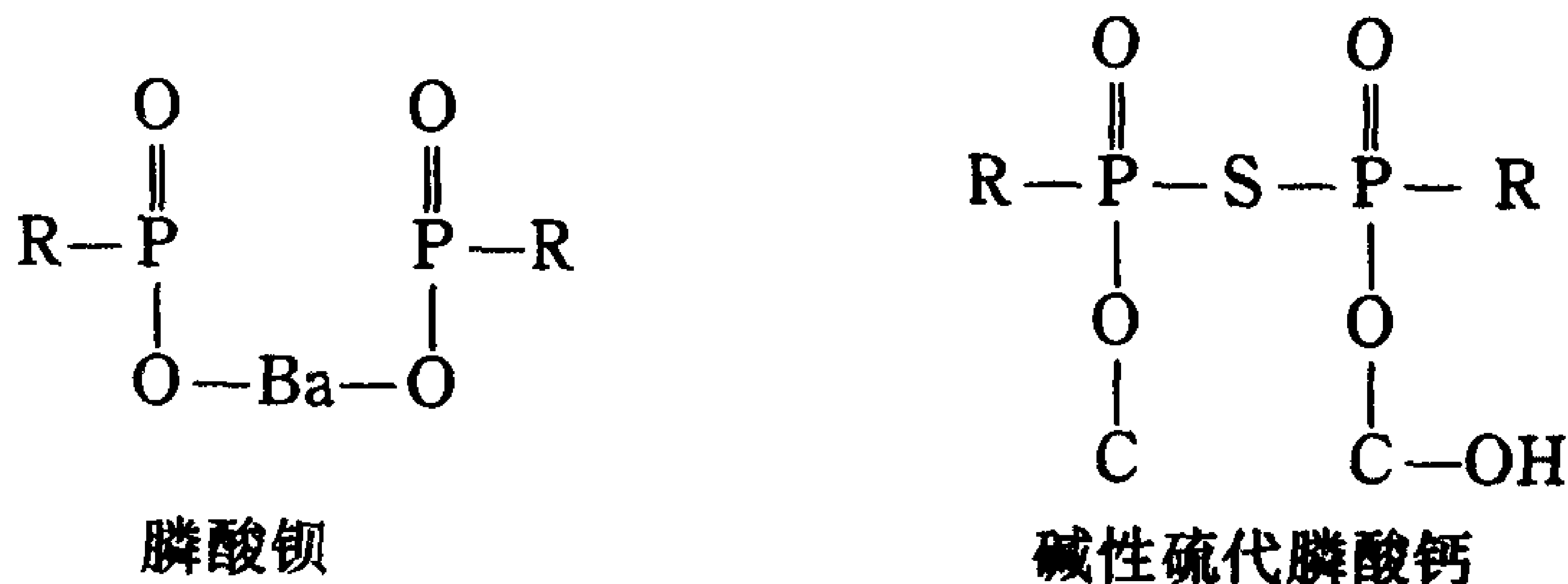


碱性烷基酚钙　　硫化烷基酚钡

金属烷基酚盐和金属硫化烷基酚盐给润滑油提供了高温稳定性、分散性和抗氧化能力。碱性烷基酚盐或硫化烷基酚盐还具有中和酸的能力。

3)金属膦酸盐和（或）金属硫化膦酸盐

五硫化磷与聚烯烃（如聚异丁烯）起化学反应生成金属（或碱性金属）膦酸盐或金属（或碱性金属）硫化膦酸盐。其金属一般是钙和钡，其分子结构式是：



膦酸钡　　碱性硫代膦酸钙

其中R是烃链，衍生自C_{35}-C_{70}聚丁烯。

这些化合物起到清净-分散添加剂的作用，并能中和酸。它还具有抗氧化能力和一定的热稳定性，并能有效地控制低温沉积物的生成。由于热稳定性较差，这种添加剂主要用于中低档柴油机油。

4)烷基水杨酸盐

这类清洁剂是金属（或碱金属）的长链烷基水杨酸盐，不如前面三种清洁剂使用广泛。

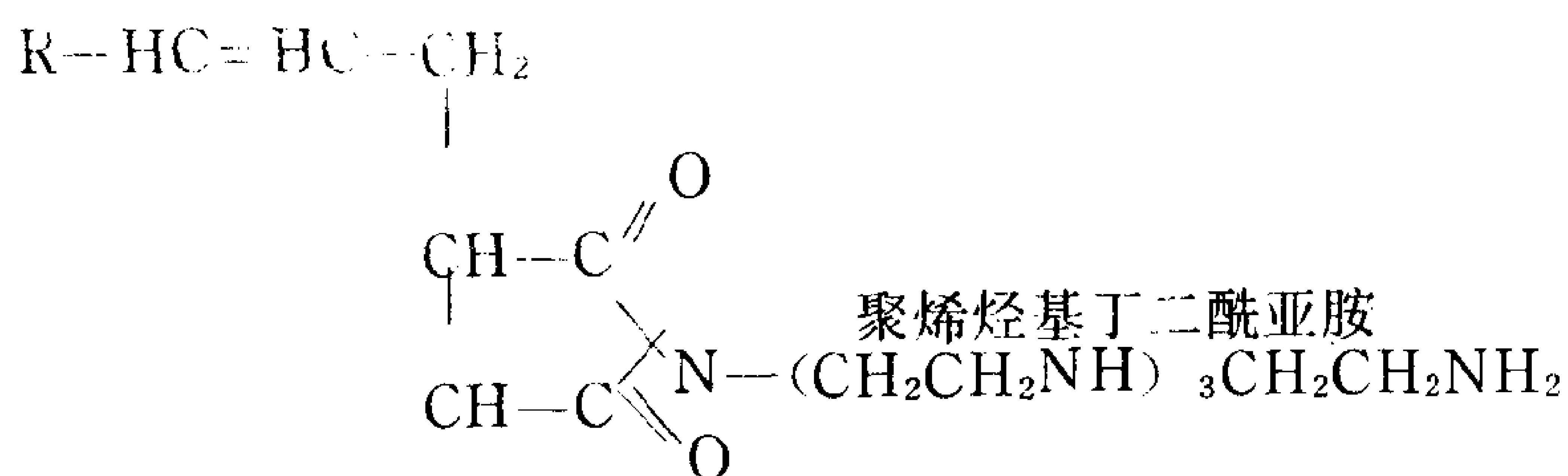
5)高碱清洁剂或碱性清洁剂

油溶性磺酸盐或酚盐在催化剂或触媒存在的条件下，跟高比例的碱金属（通常是钙或钡）一起加热，其中金属的氢氧化物被分散为胶体状，粒子大小是$10^{-3}\sim1\,\mu m$，在过滤前加入二氧化碳使其变成碳酸盐，以提高碱金属含量。生成的这种高碱清洁剂的总碱值可达300或300 mgKOH/g以上，用于调配气缸油和高档筒状活塞柴油机油。

无灰分散剂是柴油机油的主要添加剂。金属清净分散添加剂遇到水后，其分散能力大大下降，而无灰分散剂能分散在低温工作条件下形成的油泥（这些油泥是由燃油的燃烧产物、未燃烧的燃油、炭粒、抗爆震剂的铅残渣和水等组成的复杂混和物），将无灰分散剂与金属清净分散添加剂一起使用，使低温油泥得到解决，提高了润滑油的质量，并使金属清净分散添加剂的用量大大下降。

无灰分散剂主要分为非聚合型和聚合型两种：

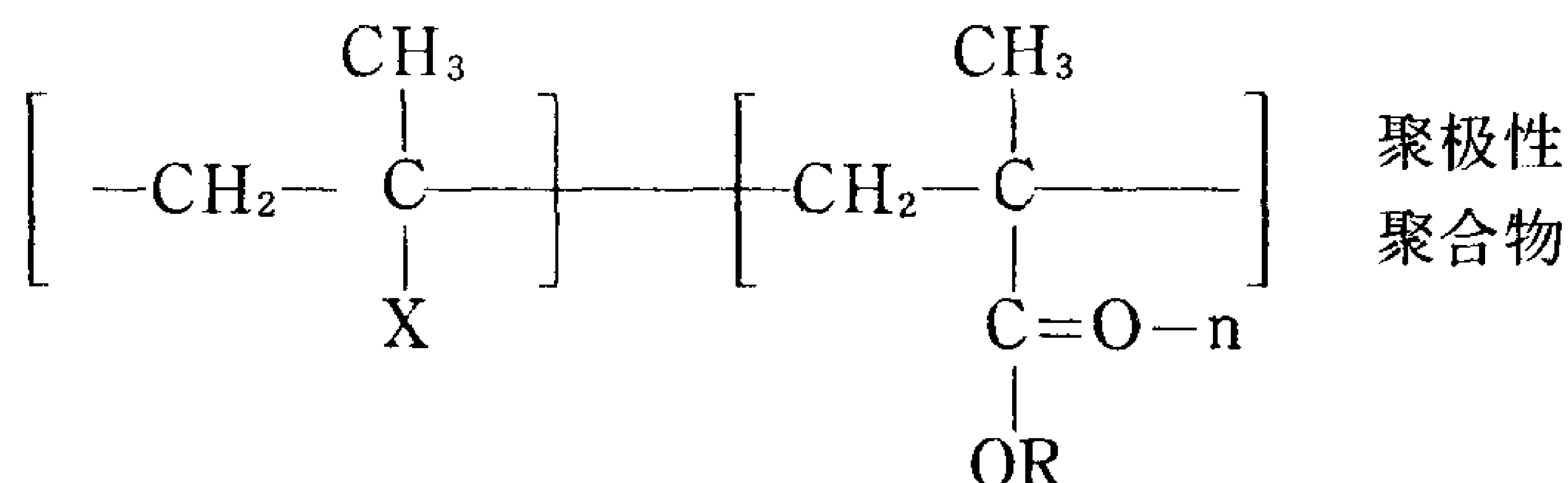
1)非聚合型无灰分散剂　其典型的分子结构如下：



其中R是聚异丁烯，分子量约1000。

这种添加剂在高温和低温下都是强力分散剂，它被酸中和后，仍能抵御强酸，防止油和金属受腐蚀。因此调制汽油机油、柴油机油和气缸油都选用这类添加剂。

2）聚合型无灰分散剂其典型的分子结构如下：



其中R为C_1到C_{22}的烃基分子团。X为极性分子团，如乙烯基酯吡咯烷酮，双烷基氨基甲二甲基丙烯酸盐的共聚物。

这种添加剂控制汽油机沉积物很有效，并能起粘度指数改进剂的作用，但若在柴油机的工作温度下则会分解。

3.2.2 防锈添加剂和抗腐蚀剂（Rust and Corrosion Inhibitors）

有氧气存在时，水对黑色金属的化学侵蚀过程就是生锈。润滑油中用以防锈的添加剂有烷基丁二酸及其衍生物、磺酸酯、胺类、磺酸或膦酸及其化学盐等。这些添加剂具有极性，吸附在金属和油的界面上，形成保护层，防止水和金属接触。

抗腐蚀剂保护有色金属表面，特别是轴承表面，使其不受油氧化产生酸或燃气产生的酸所腐蚀。抗腐蚀剂能中和这些酸，有些抗腐蚀剂还会在金属表面上形成能抗腐蚀的表面层，即钝化层。这类抗腐蚀剂有二烷基二硫化磷酸锌（ZDDP）、二硫化氨基甲酸盐、硫化萜类、磷酰硫化萜类等。其中有些同时也是抗氧剂。

3.2.3 抗氧剂（Antioxidants）

润滑油在使用中通常在高温（一般是90～100°C）下接触空气，短时温度会高达300°C以上，如在活塞环区域。

润滑油这时进行的一系列复杂的氧化反应，其速度取决于氧气浓度、温度和铜铁催化剂的存在。其大致过程如下：

开始阶段，烃和氧起反应：



$RH+O_2 \xrightarrow{能量} RO_2$（具有游离根的过氧化物）

接着，继续反应生成过氧化氢和使烃具有游离根：



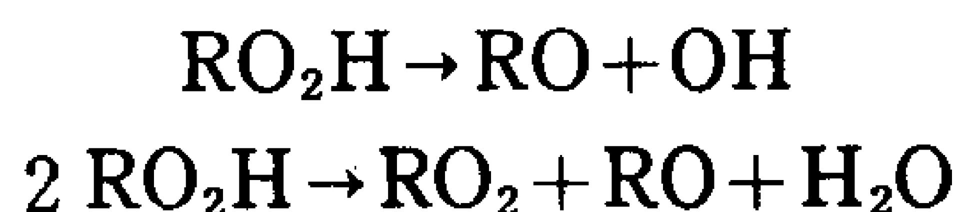
$$RO_2+RH\rightarrow RO_2H+R$$

（过氧化氢）



$$R+O_2\rightarrow RO_2$$

过氧化氢在铜和铁的催化下分解：



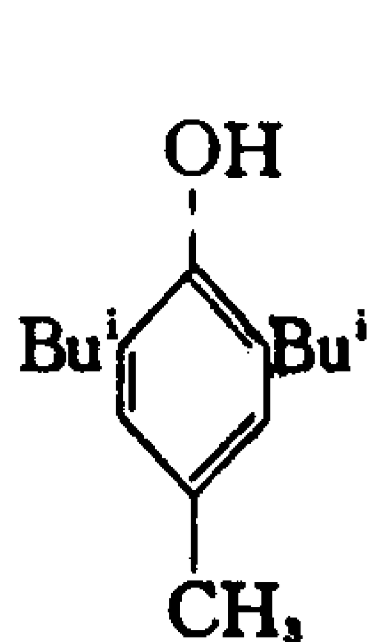
$$RO_2H \rightarrow RO + OH$$

$$2\,RO_2H \rightarrow RO_2 + RO + H_2O$$

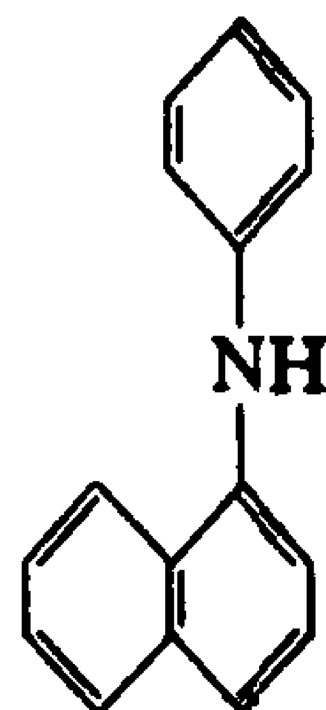
这样下去氧化产物越来越多。

抗氧剂加到润滑油中起作用的原理是：

1）给具有游离根的过氧化物输送氢离子，防止反应继续下去，如2.6-二叔丁基-4-甲基苯酚和苯基-α-萘胺就是起这种作用，其中的苯酚和芳香胺阻止RO_2继续反应。

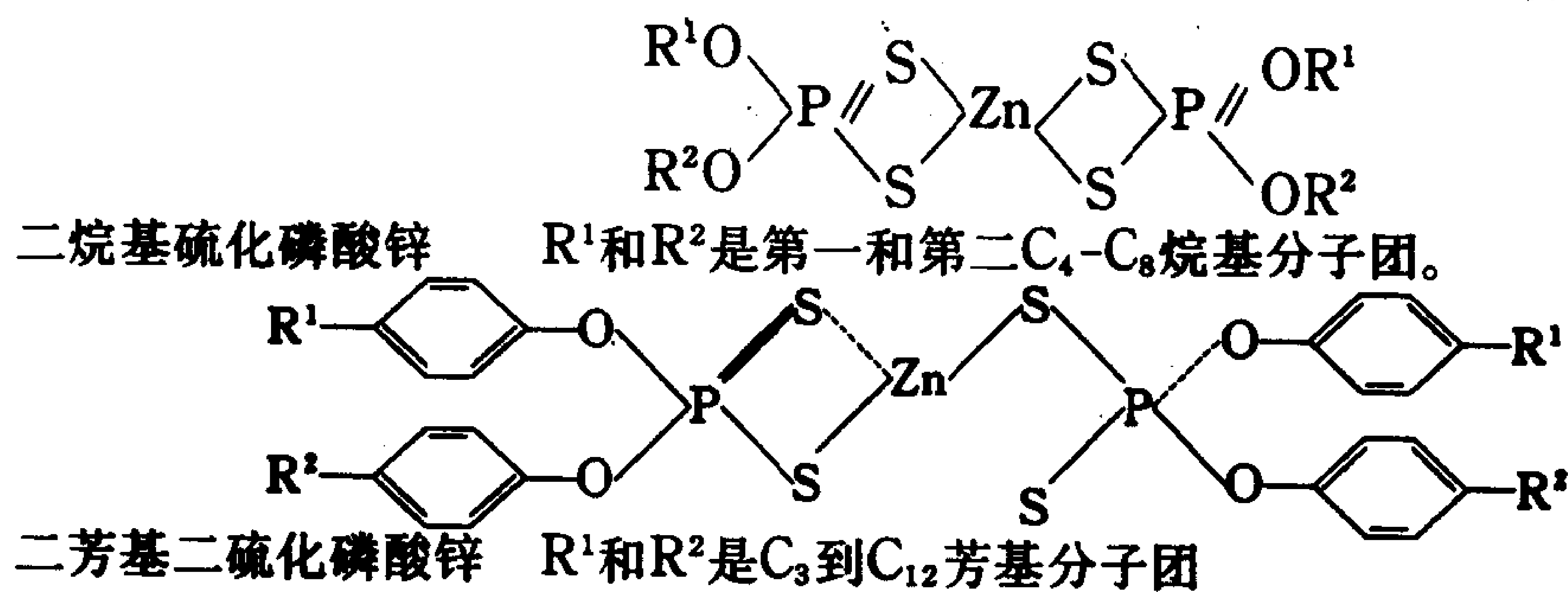


2.6-二叔丁基-4-甲基酚



苯基-α-萘胺

2）破坏过氧化氢：这类添加剂有二硫代磷酸盐、二硫代氨基甲酸和有机硫代物。



二烷基硫化磷酸锌　R¹和R²是第一和第二C_4-C_8烷基分子团。

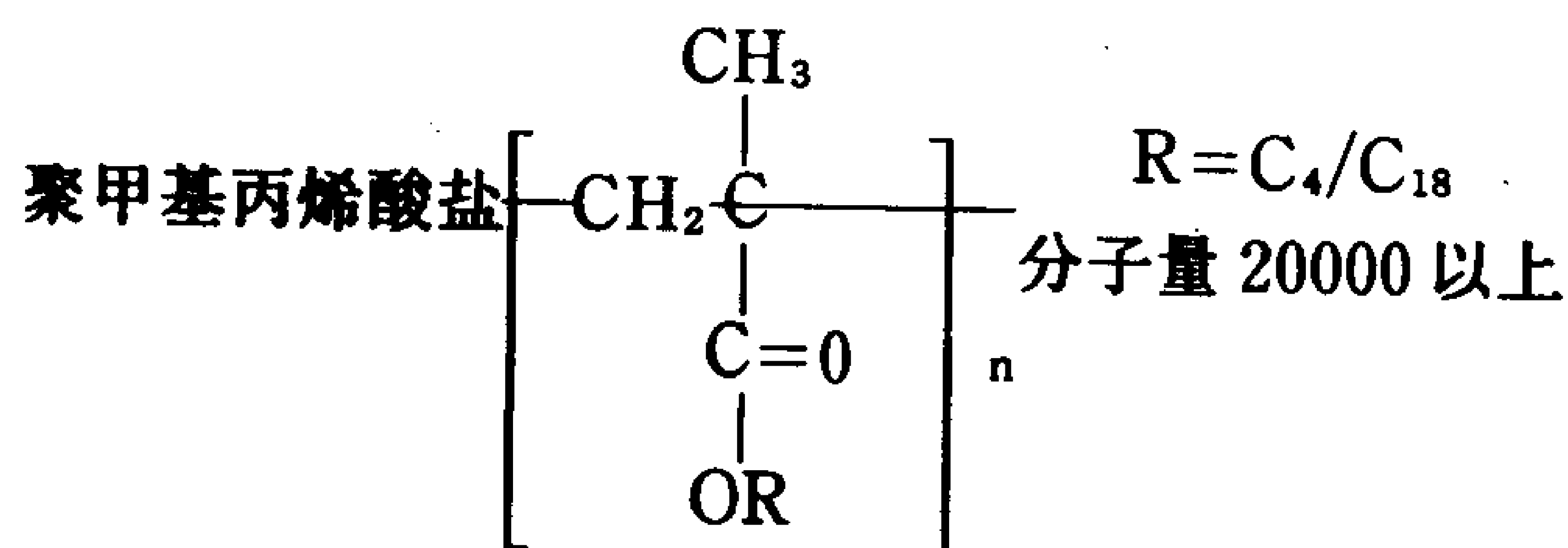
二芳基二硫化磷酸锌　R¹和R²是C_3到C_{12}芳基分子团

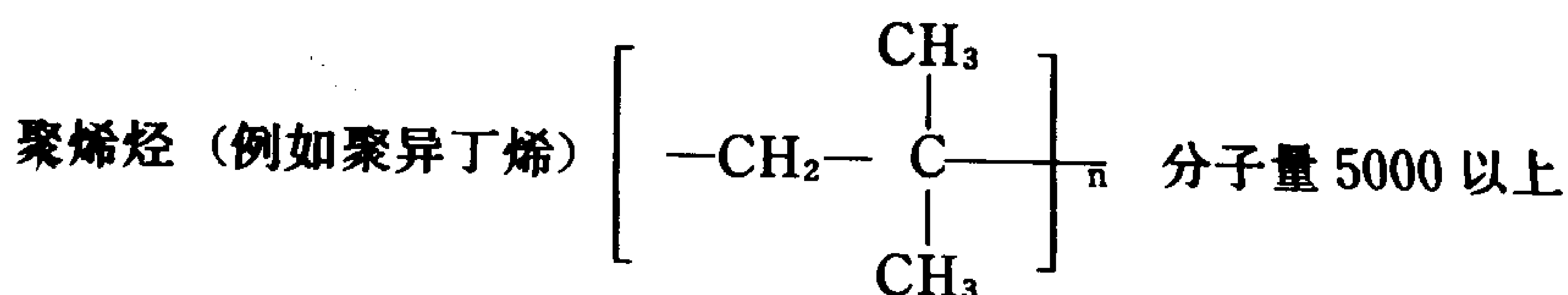
以上两种添加剂经过选择，一起使用可以得到明显的协同作用。

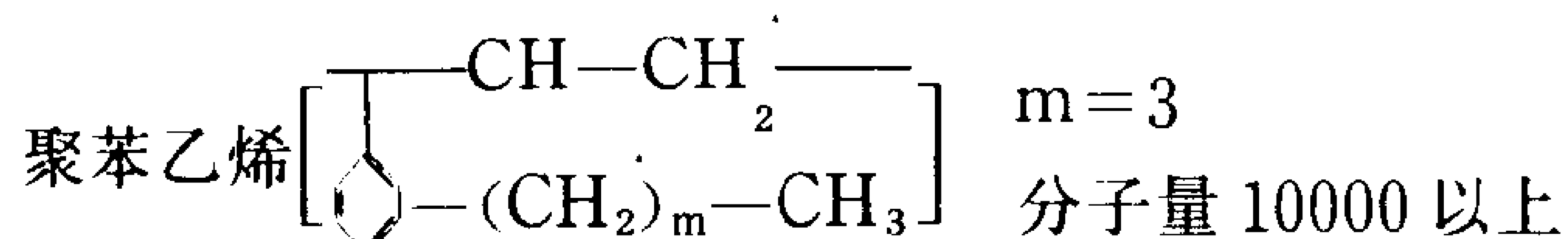
在柴油机油、汽轮机油、齿轮箱油、液压油中，都按工作条件加入了各类型的抗氧剂。

3.2.4　粘度指数改进剂（Viscosity Index Improvers）

理想的润滑剂最好是各种温度下粘度相同，但实际上所有油的粘度都随温度而变，但变化率取决于油的性能，粘度指数反映油抵抗粘度随温度而变的能力。需要对粘度加以控制的润滑油，就要加入粘度指数改进剂。这种化合物通常是高分子量聚合物，如聚丁烯或聚甲基丙烯盐或聚苯乙烯，分子量一般在5000～20000的范围，其典型的结构如下：







这些聚合物分子在低温时，只有少数溶解在基础油里，收缩卷曲，对粘度影响不大。当温度升高时，聚合物分子溶解度增加，并且膨胀和伸展，使油的粘度增加，这就减少了基础油因温度升高而使粘度下降的影响。

润滑油受到高剪切应力时，可能发生两种类型的粘度损失。

1）临时粘度损失：某些卷曲的聚合物顺着流动方向伸展排列，使粘度临时下降；剪切应力消除，粘度恢复正常。这种性能在冷起动时对机器设备有好处。

2）永久性粘度损失：由于更严重的剪切应力的作用，聚合物的链被切断，起不到粘度指数改进剂的作用，产生了永久性的粘度损失。

柴油机油、液压油和齿轮箱油都需要加入粘度指数改进剂。粘度指数改进剂品种很多，且各有特点。因此，要根据工作要求选择和加入适当的粘度指数改进剂。

3.2.5 降倾点剂（Pour-point Depressants）

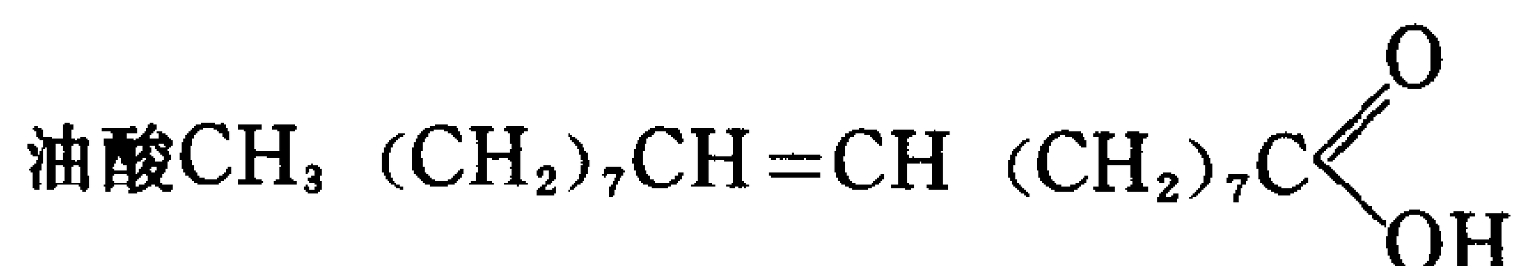
倾点是油流动的最低温度。低于这温度，石蜡结晶会阻止油流动。炼油中不可能全部清除这些石蜡。为了较经济地解决这个问题，需在润滑油中放入降倾点剂。这种添加剂常用的有聚甲基丙烯酸盐以及烷基石蜡，烷基萘、烷基石蜡酚，聚丙烯醛酰胺，碱金属磺化盐和各种树脂等。这些添加剂通过吸附石蜡结晶或与石蜡结晶起共晶作用，改变了晶体结构，形成了较小的晶粒。这些小晶粒对油流动阻碍不大，因此，油能在较低的温度下流动。

是否使用降倾点剂及其使用的品种和用量，主要根据基础油的性质而定。

3.2.6 油性剂、抗磨剂和极压剂（Oilness,Antiwear and Extreme Pressure Agents）

在边界润滑条件下，金属和金属接触会导致挤掉油膜，从而出现严重的磨损和损坏现象。

在润滑剂中加入油性剂，可以起到减低磨损作用。油性剂含有极性分子团，对金属表面有很强的亲和力。它被吸附在金属表面上，形成一种类似于缓冲垫的保护膜，防止金属之间的直接接触，从而减少了磨擦和磨损。这类油性剂有脂肪酸脂、脂肪酸和醇等。例如：

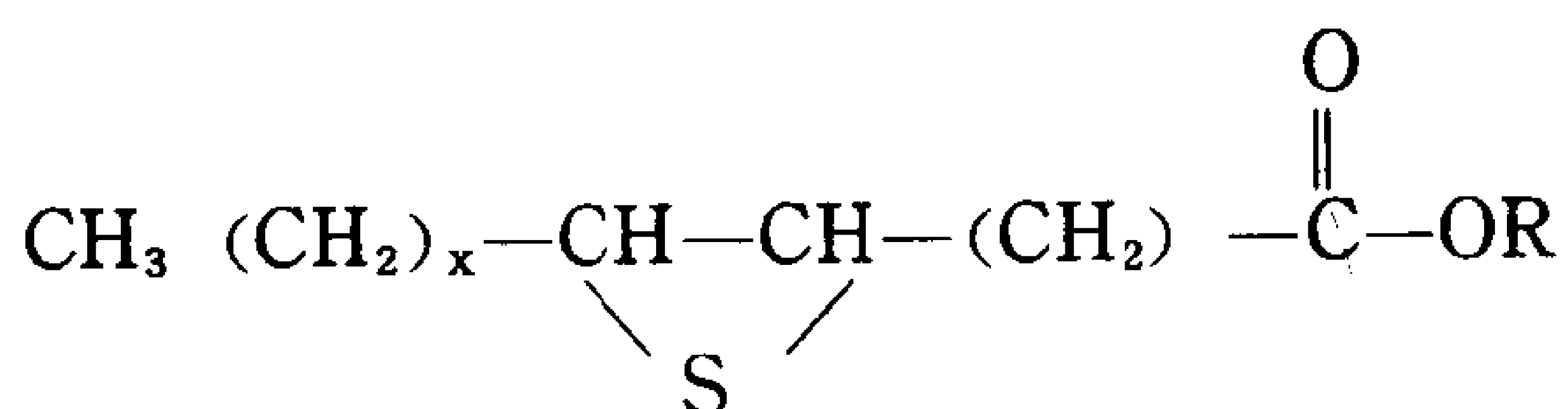


油性剂对金属的吸附主要属于物理吸附。它随着温度的升高而下降。一般温度高于120°C，其吸附就失效了。因此它只在负荷和温度较低的条件下使用。

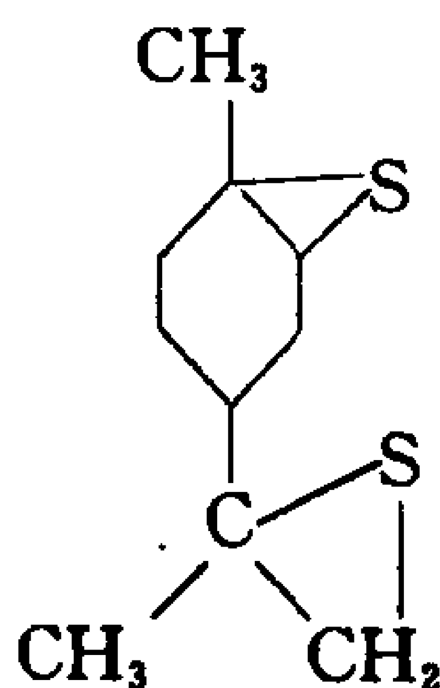
在润滑剂中加入抗磨剂后，在中等负荷下，如油膜发生断开，抗磨剂这时起作用，形成一层磷酸盐或亚磷酸盐的保护层。磷酸脂、二硫代磷酸金属盐，是有效的抗磨剂。后者产生的保护层含有锌、磷和硫。

在润滑剂中如果加入极压添加剂，当金属与金属之间的界面负荷升高（如齿轮逐步啮合时），积聚的油膜临近崩溃时，极压剂这时起作用。由于摩擦的金属表面间产生大量热，在高温下极压剂与金属表面起化学反应，生成一层熔点较低和剪切强度较差的化学反应膜，以防止金属表面擦伤和熔焊。被广泛使用的极压剂是有机硫化物或有机二硫化物。如：

（1）硫化脂肪酸类（以硫化鲸油为例）：



（2）硫化萜类（以二聚戊烯为例）：



（3）二硫化物类（以二硫化二苄为例）：



这些化合物都是天然硫化萜类混合物或由不饱和脂肪酸脂加工而成。此外，还有许多含氯的化合物用作极压剂，如氯化石蜡和氯化石脑油；一些有基磷酸盐，有机亚磷酸盐和某些铝皂也可用作极压剂。其反应过程大致是：这些添加剂被吸附在金属表面上，当金属接触时发生的高温使油膜被破坏时，金属和极压剂立即反应，生成由硫化铁，氯化铁或磷酸铁-亚磷酸铁的承载薄膜。这实际上是一种控制性的腐蚀现象，有时称为“化学抛光”。

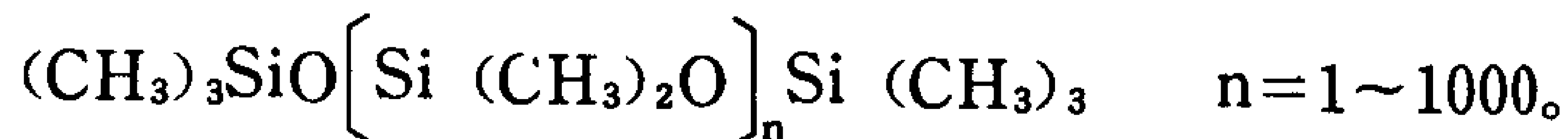
当温度和负荷条件在广阔范围内交替变化时，对表面薄膜的要求也有所不同，因此，在润滑油中往往加入多种添加剂。油性添加剂和极压添加剂一起使用，能产生协和作用，其对摩擦的减少，比单独使用某种添加剂要强得多。

齿轮箱油，双曲线齿轮油、某些柴油机油、液压油和某些润滑脂，都添加了油性剂或极压剂。

3.2.7 抗泡沫添加剂（Antifoam Additives）

在齿轮箱、曲轴箱、液压系统中，润滑油被剧烈地搅拌，如果不作处理，可能会产生稳定的泡沫，这样就会阻止油及时供应到需要润滑的工作表面。油越粘稠，则泡沫越多。清净分散添加剂也会使油产生泡沫。

在润滑油中放入抗泡沫剂，可以减少泡沫的生成。其原理是通过减少油和空气的界面张力，让气泡迅速破灭。最普遍用的抗泡沫剂是聚有机硅氧烷，即二甲基硅油，其分子式为：


$(CH_3)_3SiO\left[Si\ (CH_3)_2O\right]_n Si\ (CH_3)_3 \quad n=1\sim1000$。

3.2.8 其它添加剂

其它添加剂有：

1）金属加工用油的乳化剂，用于乳化防锈油。

2）增粘剂：这包括一些高分子聚合物，不饱和脂肪酸铝皂及某些无机盐等。这类添加剂不仅起到改进润滑剂的流体力学特性的作用，还用来改进润滑剂的吸附能力，例如开式齿轮润滑剂就需要用这种添加剂。

3）水排除剂：这类添加剂包括有机硅和一些聚合物以及某些分子量较大的脂肪胺和羟基脂肪酸、非皂性润滑脂和一些润滑剂。在润滑油中加入了这种添加剂，它就有了排水性或阻水性。

4）染料：这些油溶性化合物，使润滑剂颜色明显，或作控制润滑剂的颜色用。

5）气味控制剂：这是油溶性的合成香味剂，用来增强或掩盖润滑剂的某些气味。

6）防腐剂和抗菌剂：这些是某些醇、醛、酚、汞的化合物和含氧化合物，在调配可溶油时要用到它们。

4 润滑剂的配制和应用

现在的船用润滑剂品种已经不少，但随着新型船用发动机和机械设备的发展，船用润滑剂也在同步发展。它们互相依存，互相促进。润滑剂的发展又促进了添加剂的发展。

一种新型船用润滑剂的产生，一般要经过下面几个过程：

1）试验室试验：对各种配方的计划发展的润滑剂，得试验其基本性能，如氧化稳定性，热稳定性，中和酸能力和抗磨性等。所有的试验项目都有各种标准，每种润滑剂都应达到某种试验标准中的某个级别或程度。然后，从中筛选出较合适的几种配方。

2）台架试验：几种配方用于专门试验的台架发动机或设备上。试验为发动机配制的润滑剂时，发动机通常安装了测量缸套、活塞环磨损的仪器，以便最后评价每次试验后发动机的磨损和清洁情况。改变燃油质量及柴油机工况，让试验发动机用各个配方的润滑剂运行一段时间，将结果进行比较，筛选出较满意的配方。

3）实船试验：把上述配方调制出的润滑油，在船上试用时，要选择典型的发动机，安排好试验计划，让润滑剂在发动机内经历各种工况，以便取得其运转参数。测量数据，检查结果要作出合适的安排，这个试验有时要进行 10000 h。实船试验成功后，才可以被机器制造厂批准，成为该机器制造厂的推荐用油，其它设备用油也是这样。经过这些程序后，这种油才可以投入商业性生产。实船试验后，仍要定期检查油在使用中的情况为这种新产品进一步改进打下基础。

调配润滑剂的工厂，按照订单的要求，选择不同粘度和不同粘度指数的基础油和相应的添加剂，按照配方调配出符合要求的润滑剂，并以散装或各种形式的包装方式运送给用户。为了降低运输费用，国际上许多油公司在供油较多的大港口设立润滑油配制厂，以便及时地向用户供油。

船舶所有人确定了一艘新船（或购进的旧船）用哪家油公司的润滑剂后，该分司即派技术人员上船，制定该船舶的用油目录表，其表包括如下内容：

（1）需润滑的船舶机械设备名称和型号；

（2）该种设备需润滑的部位；

（3）该部位使用的润滑剂名称牌号。

这个表制定后，装订成册，由公司提供给船舶所有人再转给船舶有关负责人，同时，该公司还提供润滑剂性能资料和加油手册以及价目表。在加油手册中，有各个加油港口情况的说明，如该港口有何种润滑剂供应；是驳船散装，还是桶装；用泵输送桶装油，还是汽车散装供油；须提前通知的期限；是否有技术服务等。船舶所有人的润滑剂主管部门和船舶轮机人员都应当掌握和熟悉这些资料，以保证船舶润滑剂得到及时供应，并得到价格较便宜的润滑剂。

如果是新购的旧船，船舶所有人还应当得到油公司关于新加油和原用油是否能混合使用的资料。

在船舶营运过程中，油公司要为用户服务，其内容包括：定期化验船舶主、辅机机油；对化验结果作出评价；及时告诉船舶所有人如何处理出现的问题；对船舶所有人在用油过程中提出的技术咨询进行答复；介绍新产品；征徇意见等。如果船舶的润滑剂用油表不是由油公司制订的，那么，船舶所有人的主管部门就要制订出这种表，让船舶按表的要求行事，以确保机械设备正常运转。

5 润滑剂的加装、贮存、保管和安全注意事项

5.1 润滑剂的加装

补给润滑剂的方法：一是驳船用泵供油，称为真正散装供油；二是从车中或标准容器中用泵供油，也属散装供油；三是用泵从油桶中输送油供船；四是成桶供应船上。

前三种方法在供给大量的气缸油、柴油机油和汽轮机油时采用。其供油成本较低，输送较快，工作量少，但只能在有这种设备的港口才可采用。在接受前三种方法供应前，轮机长和主管轮机员应检查驳船油舱或装油容器的存油量和品种，检查油管是否接对接好，确定供油流量，还要检查待装的油柜阀门是否打开。有些船舶只设置一根装油总管通向不同品种的各油柜，事前要检查非装油的油柜的阀门是否关好，以防止装错油。如果准备散装几种润滑油，例如气缸油，主机用的柴油机油和辅机用的柴油机油。装油的次序应当是先装最不允许混油的品种，即按气缸油→辅机用的柴油机油→主机用的柴油机油的顺序。如果准备散装的是主机和辅机用的筒状活塞柴油机油，装油的次序应当是先装主机用的柴油机油，再装辅机用的柴油机油。在装某种油时，另外的油柜阀门应当关上。

装油结束后，轮机长应当再次检查驳船油舱或装油容器的数量。如果是用泵从桶中输送油供船，要检查桶中的油是否抽空。数量核对准确后，在签收单上签字；如果有异议，应和供油业务人员共同查清原因，在签收单上注明，双方共同签字确认。

桶装供应时，要检查桶盖的密封是否完好，牌号与订货单和数量是否相符。

5.2 润滑剂的贮存

1）散装油：贮存在油柜内的散装油，会受到凝结水或污物所污染，时间一长柜底会积存一层泥渣状的物质，污染了注入的润滑油。因此，贮存柜底部必须是倾斜或漏斗形状，以便定期放走水和污染物；同时，要定期清洁贮存柜的内部。各贮存柜要写上油名，便于识别。

2）桶装油：桶装油应当存放在贮存间内。无论用过或没用过，油桶的盖子都要盖严。油桶最好是平放在专门的铁架或木架上，如果没有架子，也应当平放，还要用楔子放在底部，以防止油桶滚动。要经常检查油桶是否漏油，油名标志是否清楚。如果油桶非要直放不可，应使桶倒置，即将有盖的一端放下。如果这点也做不到，那么起码要倾斜放，防止水集结在盖子周围，造成水污染。在取油时，可以将油桶平放在一个有一定高度的架子上，在盖子口上装一个放油阀，阀下面放一个盘子，以防止油飞溅污染环境。也可将油桶直放，用油桶抽吸泵插入桶中，将油抽出使用。

3）润滑脂：润滑脂比润滑油对温度更敏感，必须存放在贮存间内，贮存间的温度不宜过高或过低。润滑脂容器的开口很大，易受水和污染物污染，因此用后必须将盖子盖严。

5.3 润滑剂的保管

1)从贮存柜或油桶中取油给机器加油的容器、漏斗、油壶等要保持清洁，擦拭容器要用干净的破布，不要用棉纱或毛布。

2)每种润滑油要有单独的取油和加油容器。容器上要有鲜明的标志，以免不同的润滑油相混。

3)用过的润滑油和污油要用专门容器另外存放，并标志清楚，防止它们污染新鲜油。

4)润滑脂比润滑油更需要保持清洁。

5)机器加油应由专人定期进行。

6)油柜和贮存间的润滑剂要定期测量和盘点数量。各种机器设备应有加润滑油的记录，以便核查润滑剂的消耗是否正常，如有明显变化，应查明原因。油消耗量的增加往往是机械需要修理的信息或表示润滑系统需要调节。

5.4 安全注意事项

经常与油类接触的轮机人员，应遵守下列规则：

1)使用护目镜、保护性衣服、非渗透性围裙及手套等，防止与油类的不必要接触。

2)如不能用非渗透性手套时，可擦抹适当的防油护手膏。

3)不可将油污染的碎布放入衣袋和裤袋里。

4)不要用污布去擦拭皮肤，防止污布上的金属颗粒等杂质划伤皮肤而引起感染。

5)皮肤划伤要立刻治疗。工作后要洗净皮肤。清洗皮肤不要用煤油、汽油等溶剂，要用肥皂或专用清洁剂。清洁后要擦涂护手膏。

6)不要穿被油浸透过的衣服，要定期更换和清洗工作服，尽量防止衣服特别是内衣裤被油沾污。

7)发现身体有疹、疮或瘤等，应立即进行治疗。

第 2 章　柴油机润滑油

本章和 3、 4 章列举的国外润滑剂性能资料，来自有关产品说明书，多数是产品实际数字积累的平均值，国内产品缺实际性能资料，只能列出国家标准或部颁标准或企业标准。

为了简化篇幅，所列各油公司名称简写为：

AGIP＝阿吉普石油产品公司
BP＝英国石油贸易有限公司
CASTROL＝嘉实多有限公司
CHEVRON＝雪弗龙国际石油公司
ELF＝埃尔夫石油公司
ESSO＝标准石油有限公司
FEOSO＝东方石油有限公司
MOBIL＝美孚石油有限公司
SHELL＝蚬壳有限公司
TEXACO＝德士古有限公司

1　气缸油

1.1　气缸油的用途及其要求

气缸油用于：1）烧燃料油的低速柴油机的气缸润滑油。2）作为苏尔寿 RTA 型柴油机液压传动排气阀杆的润滑油。

在燃油质量越来越低劣，低速柴油机的平均有效压力不断提高，气缸油的工作条件越来越恶劣的情况下，对气缸油的基本要求是：

1）在高温下仍有足够的粘度，并能迅速分布到整个工作表面。
2）能良好地湿润金属，在活塞环和缸套之间形成有效的密封。
3）燃烧后留下的沉淀物要少而软。
4）能将滑动摩擦减到最小，减少摩擦磨损和磨粒磨损。
5）能有效地快速地中和含硫燃油燃烧形成的矿物酸。
6）将活塞环区域和气缸套气口处堆积的沉淀物减到最少。

1.2　气缸油的种类

气缸油有下列几种：

1）各种总碱值气缸油：这类正常使用和用得最多的气缸油，都属 SAE50粘度等级，总碱值有 10～16、40～50、65～80、85～100 几种，柴油机烧不同硫分的燃油，要选用不同总碱值的气缸油。苏尔寿厂和 MAN-B&W厂的要求见表 2.3.2-1 和表 2.3.2-2 。

表 2.3.2-1　苏尔寿厂对总碱值的要求(RTA柴油机)

燃油硫分%	低于 0.5%	0.5～1%	高于 1%
总碱值	15	20～25	60～70

表 2.3.2-2　MAN-B&W厂对总碱值的要求

燃油硫分	1%	2%	3%
总碱值	10	40	70

表 2.3.2-3 国外船用气油性能

油公司	油名	SAE数	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	粘度指数	闭口闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
AGIP	PUNICA 470	40	0.935	164	16	70	95	230	−10	
	PUNICA 570	50	0.945	250	21	70	95	230	−10	
	PUNICA SPECIAL	60			24	85				用作长冲程十字头柴油机气缸油
BP	ENERGOL OE 220	50	0.908	232	18.2		85			新缸套跑合用油
	ENERGOL CL 404	40	0.940	153	13.9	40				用作三菱UE柴油机气缸油
	ENERGOL CLO 50 M	50	0.954	209	17.0	70		238		用作烧含硫量低于4%的燃料油的柴油机气缸油
	ENERGOL CL 856	>50	0.949		24.3	85	95			曾用作苏尔寿RLB柴油机气缸油
CASTROL	MARINE RM	40	0.880	150	14.5		94	255	−18	新缸套跑合用油
	MARINE S	50	0.885	186	16.8		95	261	−9	
	MARINE RM/DZ	40	0.910	144	14.6	40	100	219	−9	用作烧含硫量低于2%的燃料油柴油机的气缸油
	MARINE S/DZ	50	0.925	210	17.2	40	98	219	−15	
	MARINE S/DZ 65	50	0.925	187	17.3	70	98	213	−12	
	MARINE S/DZ 805	50	0.943	177	17.0	80	102	210	−12	
	MARINE S/DZ SUPER	>50	0.946	317	24.5	85	98	210	−6	曾用作苏尔寿RLB柴油机气缸油
	MARINE S/DZ SUPER X	>50	0.956	317	24.5	100	98	208	−6	
CHEVRON	DELO CYLOIL EXTRA	>50	0.96	320	24.0	85		250	−9	曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	DELO CYLOIL SPECIAL	50	0.95	224	20.0	70		250	−9	
	DELO CYLOIL HEAVY	50	0.93	220	20.0	50		250	−9	
ELF	TALUSIA 40	50	0.920	185	18.0	40			−15	
	TALUSIA 70	50	0.935	195	20.0	70			−15	

续上表

油公司	油名	SAE数	相对密度 (15.5°C)	运动粘度 40°C mm²/s	运动粘度 100°C mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	粘度指数	闭口闪点 (°C)	倾点 (°C)	说明
ELF	TALUSIA XT 100	50	0.950	195	20.0	100			−15	
	TALUSIA XT 40	50	0.920		18.0	40			−12	
	TALUSIA XT 70	50	0.930		20.0	70			−12	曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	TALUSIA XT 85	>50	0.940		24.5	85			−9	曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	TALUSIA XT 100	>50	0.950		24.5	100			−9	曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	ATLANTA MARINE 60	50	0.910	245	16.5			255	−24	新缸套跑合用油
ESSO	EXXMAR X 22	>50	0.912	270	22.0	22	100	244	−9	用于烧低硫燃油的柴油机
	X 60	50	0.935	240	19.5	60	94	234	−9	用作中等功率柴油机气缸油
	X 70	50	0.945	240	19.5	70	94	230	−9	
	X 90	>50	0.965	330	24.5	90	95	224	−9	
FEOSO	FEOCY 51	50	0.910	198	18.0	10	99	220	−15	
	54	50	0.922	202	18.2	40	99	240	−15	
	44	40	0.920	153	15.0	40	98	235	−15	
	57	50	0.944	196	18.0	70	100	220	−15	
MOBIL	MOBIL GARD 593	50	0.930	200	19.7	40	99	230	−4	用作烧低于4%含硫量燃料油的柴油机气缸油
	570	50	0.940	200	19.8	70	99	230	−4	用作烧低于4%含硫量燃料油的柴油机气缸油
	685 S	>50			24.0	85	95			曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	685 M	>50			24.0	85	95			曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	599 M	50			19.0	100	95			曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	699 S	>50			24.0	100	95			曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
	699 M	>50			24.0	100	95			曾用作苏尔寿 RLB 柴油机气缸油
SHELL	ALEXIA D OIL	50	0.905	260	19.0	16	80	227	−21	用于烧低于1%含硫量的柴油机的气缸油
	DILOMA OIL	40	0.920	168	15.3	40	91	216	−9	曾用作三菱 UE 柴油机气缸油
	ALEXIA OIL 50	50	0.945	227	17.0	70	75	224	−21	
	ALEXIA X OIL	50	0.974	274	19.0	100	74	227	−21	用于烧含硫量高于3-3.5%的燃料油时的柴油机气缸油
TEXACO	TARO SPECIAL	50	0.951	217	17.2	73	82	260	−12	

油公司对燃油硫分和相配的气缸油有不同的推荐，如 MOBIL 公司认为总碱值 70 的气缸油 MOBILGAR570用于烧 4％硫分燃料油时已足够；但 SHELL 公司推荐烧 3.5%硫分燃料油时，需用总碱值 100 的 ALEXIA X OIL 气缸油。

2)总碱值 40，粘度等级为 SAE 40 的某些气缸油，用来作烧燃料油的三菱 UE 柴油机的气缸润滑。

3)总碱值为 70,85 或 100,而粘度等级大于 SAE50的高粘度气缸油，曾用来作过长冲程的某些苏尔寿 RLB 型柴油机的气缸润滑，也有一些长冲程高负荷柴油机用来作气缸润滑油。

4)新气缸套磨合用气缸油：这种油不含添加剂多数属 SAE50粘度等级，新发动机或更换新气缸套后，这些缸套在开始运行时用这种油作气缸油磨合一段时间，磨合结束后，换回正常用的气缸油。

各种气缸油的性能资料请看表 2.3.2-3 和表 2.3.2-4。

表 2.3.2-4 国产船用气缸油标准

项目	10 号船用气缸油	40 号船用气缸油	70 号船用气缸油	试验方法
运动粘度 (mm^2/s)				GB265
40℃			实测	
50℃	实测			
100℃	15～18	14～19	17～21	
总碱值 (mgKOH/g)	12	40	65～72	SY2455
凝点 (℃) 不高于	－5	－10	0	GB510
开口闪点 (℃) 不低于	215	215	220	GB267
机械杂质 (%) 不大于	0.01	0.02	0.005	GB511
灰分 (%) 不大于	0.5	40	实测	GB508
企业标准编号	甘Q/SY8044-77	甘Q/SY8042-75	沪Q/GQ3-062-82	

1.3 使用中注意事项

1)气缸油贮存柜要定期从泄放阀放走水分和沉淀物，并要定期放空清洁。

2)按常用燃油的硫分和发动机说明书的要求，与油公司协商选取合适总碱值的气缸油。

3)新发动机或换新缸套后，在开始运行时要进行磨合。这时要烧高硫分燃料油，使用粘度等级为 SAE50的纯矿物油或低总碱值的柴油机油作为磨合时的气缸用油。磨合时间和操作方法以发动机说明书的规定为准。

4)各发动机说明书都规定了发动机初运行和正常运行的气缸油供油率，而正常运行时的气缸油供油率随发动机负荷、燃油硫分、气缸油总碱值而变。要将这个数字查出来作参照基础，检查实际供油率是否达到。最后以气缸套和活塞环的磨损率以及气缸状况作验证，并作必要的调整。

通常回流和横流扫气的发动机气缸油供油率高于直流扫气发动机，长冲程发动机气缸油供油率高于较短冲程发动机。

5)活塞环的磨损率通常高于气缸套的磨损率，有时是后者的 10 倍。如果气缸套磨损率很高，就要认真查找原因，除了考虑气缸油的品种选取是否恰当，供油率是否合适外，还要从多方面查找原因，例如：

(1)磨合期的操作

磨合期间是气缸使用中最艰苦的时期，这个过程的最重要的要求是平整气缸套和活塞环的表面粗糙度，使金属表面发生金相变化，形成有耐腐蚀的加工硬化层。其磨损性能优于原来的材料。正确的磨合程序能达到这个目的。如果不按照发动机说明书关于磨合的操作程序

去做，就会出现拉缸和高磨损，以导致活塞环漏气，油膜损坏，最后引起咬缸。

（2）燃烧质量

燃油在燃烧室中的燃烧质量，会影响发动机温度及缸套磨损。燃烧质量受到下列因素影响：①助燃空气是否质优量够，这和环境温度、空气质量是否良好，废气涡轮增压器的效率，即空气端、涡轮端的清洁程度和空气冷却器的清洁程度有关；②燃油质量；③燃油的分油操作正确与否；④进主机的喷油粘度是否合适；⑤高压油泵的工作情况和喷油定时是否正确；⑥喷油器的开启压力是否合适和雾化状况是否良好。

（3）气缸温度

气缸套的表面温度如果低于酸的露点，燃气中的酸性气体如三氧化硫会形成酸而产生腐蚀磨损。避免气缸内发生酸腐蚀，要提高气缸冷却水温度，使其保持在说明书规定的范围内，特别在低负荷下运转时，更要将冷却水的温度保持在规定范围的上限。另外，如果燃烧高硫分燃料油，气缸油供油率要适当增加，气缸套的表面温度也不能高于 180～200℃。如果高出这温度，气缸润滑就会受影响，气缸和活塞内会产生热应力和变形。

（4）发动机超负荷

发动机超负荷时，由于高温和热负荷高，减少了油膜厚度和使活塞和气缸套变形。现在多数发动机在部分负荷或减功率下运行，很少在满负荷下长期运行。但如船体过渡污染时，在浅水道中顶风或顶流航行时，为了达到原来的转速，很可能造成满负荷或超负荷。

（5）扫气空气中的水分

当空气的相对温度高时，有大量冷凝水随扫气空气进入气缸套里，在高增压发动机中，其冷凝水量可能每天达好几吨。这是因为空气冷却器的管子温度太低，空气中的水分凝结在管壁上，被扫气空气带入气缸。这些水会洗掉气缸壁上的油膜，与燃气中的三氧化硫形成硫酸，造成腐蚀磨损。

要避免产生上述情况，扫气道的除水装置要保持正常工作。在空气潮湿时，扫气温度不能过低。冷却水的进口温度，要按照进气的相对湿度和温度加以控制。

（6）安装

活塞安装时，如果活塞和气缸套的中心线没有对好，运转时活塞偏向一侧，使气缸套这一侧面比另一侧面承受大得多的负荷，这样，气缸套这一侧面的油膜将被挤掉，发生气缸套偏磨和刮损现象。

活塞环和环槽的间隙很重要，发动机长期运转后，环槽磨损，新换的活塞环如不配合，就会使二者在高度方向的间隙过大或过小，就会使缸套产生磨损。

2 十字头低速柴油机油

十字头低速柴油机油常简称为柴油机油或机油，亦称系统油、曲柄箱油。

2.1 柴油机油的种类和用途

柴油机油大致分为三种：

（1）含抗氧防锈添加剂的柴油机油：这种油没有总碱值的指标或总碱值低于 1，用于曲柄箱和气缸之间密封良好的低速柴油机和活塞不用油冷却的低速柴油机作轴承润滑，成本较低。

（2）含清净分散添加剂的柴油机油：这种油含有清净分散添加剂，其总碱值为 5 ～ 9，

用于活塞用油作冷却的低速柴油机并作为曲柄箱和气缸之间密封较差的低速柴油机的轴承润滑和活塞冷却用油。

(3)多用途柴油机油：这种油除结合了清净分散添加剂外，还结合了极压添加剂等，除了可用于低速柴油机的轴承和活塞冷却用油外，还可用作：(1)烧柴油的筒状活塞柴油机的用油；(2)空气压缩机的用油；(3)液压舵机和可变螺距螺旋桨的系统用油；(4)机舱分油机、泵、和车床齿轮箱的用油；(5)当废气涡轮增压器与柴油机共用一个润滑系统时，作为废气涡轮增压器用油。采用这种油可使油品种减少，便于管理。

多用途柴油机油除上述用途外，还有：

(1)这三种油均可用于润滑中间轴轴承和密封型 SIMPLEX 尾轴轴封，并用于一般泵和机械的轴承作加油润滑。

(2)SAE50和SAE40粘度等级的柴油机油可以用作燃用柴油的低速柴油机气缸油或磨合用油。

2.2 对柴油机油的基本要求

(1)在高压下（如十字头轴承）仍能在轴承表面上保持油膜，防止金属与金属接触。

(2)具有高度热稳定性。

(3)与空气接触不致被氧化和分解。

(4)能吸收少量水分，但不会使金属生锈和使添加剂消失。分油时能迅速排除水分。

此外，要求结合清净分散添加剂的低速柴油机油，具有能中和少量漏入曲柄箱的酸性物质的能力和具有一定的清净分散能力。

为了评定其主要性能——清净分散性，一些国家和厂家制定了评定标准和方法，通常是在规定的条件下在专用发动机上进行一段时间的试验，然后评定其结果。当其结果达到规定的要求时，就认为这种油达到某一评定标准。油公司通常都说明所生产的含清洁分散添加剂润滑油的质量指标和达到哪种标准。

评定的标准和方法是随生产的发展而变化的。有些标准尽管已被取消，但有时仍被用来说明油所达到的水平。国际上多数参考美国石油学会(API)和美军(MIL-L)内燃机油的分类法，如表 2.3.2-5 所示：

表 2.3.2-5　　柴油机油清净分散水平分类表

美国石油学会分类代号	相应的美军内燃机油分类代号	相应的曾用过的分类代号
API CA	MIL-L-2104A	DEF2101D, NIL-L-9000F (SHIPS)
API CB		2-104B supp.1 Caterpillar Series I
API CC A1	MIL-L-2104B MIL-L-46152 MIL-L-46152A MIL-L-46152B	2-104B Supp 2 Caterpillar Series II
API CD	MIL-L-45199B MIL-L-2104C MIL-L-2104D	Caterpillar Series III DG ships/6922B(OMD113)
API CD-II	IG2 (MIL-L-2104D 水平)+L-38+DD6V-53T	
API CE	IG2 (MIL-L-2104D水平)+Mack EO-k/2+CumminsNTC400	

表 2.3.2-6 国外十字头低速柴油机油性能

油公司	油名	SAE数	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	粘度指数	闭口闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
AGIP	ACER 100	30	0.89	100	11.4		100	230	−15	含抗氧防锈添加剂
	CLADIUM 70 -SAE30	30	0.890	110	12.0	7	98	235	−18	含清净分散添加剂
	CLADIUM 70 -SAE40	40	0.900	168	16.0	7	98	245	−15	含清净分散添加剂
BP	ENERGOL OE -M30	30	0.903	114	11.5	1.5	85	241	−9	含抗氧防锈添加剂
	ENERGOL DL -MP 30	30	0.908	114.4	11.5	9	85	254	−9	多用途润滑油，性能超过API-CC和MIL-L-46152和达到FZG齿轮试验10级水平
	ENERGOL DL —MP 40	40	0.912	152.9	13.9	9	85	260	−9	
CASTROL	MARINE HEAVY	30	0.880	99	11		95	237	−9	含抗氧防锈添加剂
	MARINE CDX 30	30	0.885	103	11.5	5	98	226	−15	多用途润滑油，达到齿轮试验FZG的12级水平
	MARINE MPX 20	20	0.885	65	8.3	9	100	213	−15	
	MARINE MPX 30	30	0.885	105	11.5	9	96	222	−15	多用途润滑油，性能达到MIL-L-2104C和API-CD水平
	MARINE MPX 40	40	0.890	150	14.7	9	96	225	−9	
	MARINE MPX 50	50	0.890	190	17.0	9.2	95	229	−9	

续上表

油公司	油名	SAE数	相对密度 (15.5°C)	运动粘度 40°C mm²/s	运动粘度 100°C mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	粘度指数	闭口闪点 (°C)	倾点 (°C)	说明
CHEVRON	800 VERITAS MARINE OIL	30	0.890	113	12.2	6		250	−9	
	VERITAS MARINE OIL R&O	30	0.890	108	11.8			250	−12	含抗氧防锈添加剂
ELF	ATLANIA MARINE 30	30	0.890	105	11.5	<1		240	−15	含抗氧防锈添加剂
	ATLANTA DX 30	30	0.895	105	11.5	8.5		240	−12	性能达到MIL-L-2104B和FZG 10级水平
	ATLANTA DX 40	40	0.900	150	14.7	8.5		250	−12	
ESSO	EXXMAR XP	30	0.891	110	12.0		98	266	−12	含抗氧防锈添加剂
	EXXMAR XA	30	0.894	110	12.0	6	98	268	−12	达到API-CC水平和FZG齿轮试验 12 级水平
FEOSO	FEOGOD 30	30	0.890	109	11.8	8	96	210	−15	
	FEOGOD 40	40	0.893	143	14.2	8	96	220	−10	
MOBIL	MOBIL DTE OIL 3	30	0.890	113	12.1		95	218	−19	含抗氧防氧添加剂
	MOBILGARD 300	30	0.890	109	12.0	6.1	97	227	−12	
SHELL	MELINA OIL 30	30	0.897	104	11.8	8	102	227	−38	性能超过MIL-L-2104 B水平的多用途润滑油
	MELINA OIL 40	40	0.900	139	14.4	8	102	229	−9	
	MELINA S OIL 30	30	0.897	104	11.8	5	102	229	−18	性能达到MIL-L-2104B水平
	BELA OIL	30	0.885	105	11.6		98	253	−18	含抗氧防锈添加剂
TEXACO	DORO AR 30	30	0.895	118	12.1	6	87	255	−10	

表2.3.2-5中，清净分散水平最低的是API CA，最高是API CE。主要按照陆用柴油机油的分类标准来划分，但船用十字头和筒状活塞柴油机油也参照这标准来评定清净分散水平，船用大型筒状活塞柴油机的清净分散水平已相当或超过API CD的水平，其它一些性能评定方法在“对筒状活塞柴油机油的要求”中介绍。

国内外各种十字头低速柴油机油的性能资料请看表2.3.2-6～表2.3.2-8。

表2.3.2-7 我国柴油机油标准（符合GB5323—85）

项目	质量指标			试验方法
	HCA-8	HCA-11	HCA-14	
运动粘度，100℃（mm²/s）	7～9.3	10～12.5	12.5～16.3	GB265
粘度指数 不小于	90	90	90	GB2541或GB1995
闪点（开口）（℃） 不低于	195	205	210	GB267
凝点（℃） 不高于	−20	−15	0	GB510
机械杂质 不大于	0.01	0.01	0.01	GB511
水分（%） 不大于	痕迹	痕迹	痕迹	GB260
糠醛或酚含量	无	无	无	GB390或GB504
抗泡沫性（ml）				SY2669
24±0.5℃				
泡沫倾向，不大于	25	25	25	
泡沫稳定性	10	10	10	
93±0.5℃				
泡沫倾向性 不大于	150	150	150	
泡沫稳定性	10	10	10	
后24±0.5℃				
泡沫倾向 不大于	25	25	25	
泡沫稳定性	10	10	10	
酸值（未加剂）	报告			GB264
残炭（未加剂）（%）	报告			GB268
硫酸盐灰分（%）	报告			GB2433
硫含量（%）	报告			GB387
磷含量（%）	报告			SY2676
钙含量（%）	报告			SY2659
钡含量（%）	报告			SY2658
锌含量（%）	报告			SY2661

表2.3.2-8 我国两种柴油机油实际性能

油名	SAE数	相对密度	运动粘度			总碱值	粘度	闪点	倾点	说明
			40℃	50℃	100℃					
		(15.5℃)	mm²/s			(mgKOH/g)	指数	(℃)	(℃)	
D—11	30	0.885	119.6	63.4	11.88	6	96	205	−10	达到API-CA水平
D—14	40	0.888	155.4	81	14	6	94	210	−10	达到API-CA水平

2.3 使用中注意事项

（1）十字头低速柴油机油的机油循环系统各部位必须处于正常状态，运转中各处的压力、温度和循环油柜油位要保持在规定范围内。

（2）机油循环系统中的过滤器、机油冷却器、循环油柜按规定时间进行清洁或试压。

（3）主机运行时，分油机必须连续旁通净化机油循环系统的柴油机油，并按说明书选择

合适尺寸的比重环，选取 1 / 3 以下的额定流量来分油，视油的清洁情况增减流量。分油温度保持在 75～85℃。要定时排渣和定期清洗分油机。

（4）停泊时，将全部柴油机油驳送到机油沉淀柜（又称再生柜）中，保温 60～70℃。静止存放一段时间后(不少于 24 h)，从泄放阀放走底部的水和污染物；在发动机运行前，用分油机连续将柴油机油净化，驳送回循环油柜。

（5）发动机检修时注意防止水和污染物进入曲柄箱。循环柜和曲柄箱之间如有截止阀应关上，检修完清洁曲柄箱，把工具、木板等拿走，再将截止阀打开。

（6）定期取油样化验，发现问题及时采取措施。

（7）循环油柜的油位和每次补入新油的数量都要记录。每次补入新油以低于总油量 10% 为宜。

（8）许多柴油机的凸轮轴或废气涡轮增压器的润滑油自成单独系统，这部分油要定期更换，不可与主循环系统的柴油机相混。

（9）当主、辅机使用同一种柴油机油时，用过的辅机油不可与主机柴油机油相混。

(10)在正常情况下，填料箱放出的油很少；如果很多，则要检修填料箱。从填料箱放出来的油一般不宜再用到主机循环系统中去。但也有一些新式柴油机的填料箱放出许多机油，并且专门有管路和油柜回收。这部分油要严格过滤和离心分油后，取样化验合格，方可用于主机循环系统。

3 筒状活塞柴油机油

筒状活塞柴油机油常被称为柴油机油、增压柴油机油、机油，亦称为系统油和曲柄箱油。其品种繁多，主要用于筒状活塞柴油机的气缸和轴承润滑及活塞冷却，但其他方面的用途很广。

3.1 筒状活塞柴油机油的分类和用途

筒状活塞柴油机油的总碱值范围很广。总碱值越大，其清净分散性能水平越高，价格越昂贵。一般根据燃油、柴油机油消耗量，柴油机增压程度和其特殊用途来选用：

（1）总碱值 30～40，粘度等级为SAE 40 的筒状活塞柴油机油，用于烧高硫燃料油的大型筒状活塞柴油机。因为其工作条件特别恶劣。新机油使用后，总碱值开始下降较快，但随着机油消耗（很大部分在气缸中被烧掉）和补充，到一段时间后，总碱值保持一定数值不变，处于平衡状态。机油消耗得多，保持的数值就比较高。有些柴油机要求在烧高硫燃料油时，保持的总碱值不低于 20。因此，对机油消耗高的柴油机，可以选用总碱值为 30 的柴油机油；而机油消耗低的柴油机，要选用总碱值为 40 的柴油机油。

（2）总碱值为 12 以下的筒状活塞柴油机油，适用于烧柴油的筒状活塞柴油机，如发电原动机。如果柴油含硫量较高，增压度增高，换油时间较长，就要使用总碱值较高的柴油机油。

（3）总碱值为 16～25 的筒状活塞柴油机油，适用于烧含硫量为 2.5%以下的燃料油的筒状活塞柴油机，以作气缸和轴承的润滑用。

（4）多粘度等级的筒状活塞柴油机油，亦称稠化柴油机油。这种油有多个 SAE 粘度等级，如 10 w/40，20w/20等，能在较大的温度范围内使用。由于此油融合了粘度指数改进剂，其粘度指数比较高，冷机起动性能良好，适用于应急发电柴油机、应急救生艇柴油机、应急消防泵原动柴油机、应急空气压缩机（原动柴油机和压缩机）用油。

（5）总碱值为12～13，粘度等级SAE40，不含ZDDP添加剂的筒状活塞柴油机油，用作有银轴承的EMD 柴油机用油。

（6）低总碱值（12 以下），粘度等级为SAE 50 的筒状活塞柴油机油，可用作低速柴油机缸套磨合用油。

（7）总碱值为 40、粘度等级为SAE 50 的筒状活塞柴油机油，可作为低速柴油机气缸油。

当筒状活塞柴油机油作为主机机油时，还可用作：

（1）主机减速齿轮箱的用油。

（2）空气压缩机的用油。

（3）液压舵机的系统用油。

（4）可变螺距螺旋桨的系统用油。

（5）机舱中分油机、泵和车床的齿轮箱用油。

（6）当废气涡轮增压器与主机共用一个润滑系统时，作为废气涡轮增压器用油。

（7）中间轴轴承和 SIMPLEX，WAUKESHA 型尾轴轴封的用油。

（8）一般泵和机械的轴承润滑。

多数筒状活塞柴油机油都融合了一定数量的极压添加剂，故具有相当大的承受负荷能力。

3.2 对筒状活塞柴油机油的要求

1）有良好的抗氧化安定性。油氧化后会生成过氧化物和过氧化氢，最后生成酸性产物，并经聚合作用形成漆膜；氧还会裂解添加剂的分子，使其性能受损。在油中加入抗氧剂，则会防止这种反应。评价氧化稳定性的原理是：在一定温度下，通入空气、氧气或催化剂，使润滑油受到氧化，试验时或试验后测定粘度、总酸值、总碱值和沉积物等的变化情况。这项试验，IP（英国石油学会）、ASTM（美国材料化验协会）等已制订了标准，其标准是IP48，IP280，ASTM D943，ASTM D2272。

2）有良好的热安定性。

在缺乏氧而且高温的条件下，润滑油会产生热裂，形成沉积物。基础油质量好，不容易产生热裂。它结合了清净分散添加剂，能防止沉淀物积聚。评价热安定性也有不同的办法，主要原理是把温度相对低的润滑油连续喷到一块热金属板上，并把金属板上流下来的油收集起来，再喷到金属板上，如此反复循环，持续时间的长短，按润滑油的品种而定。油喷完以后，再测定金属板上的沉积物质量和润滑油在粘度、总酸值、总碱值和分散能力等主要特性的变化，最后测定其热安定性达到的水平。

3）有足够的清净分散性。能保持发动机清洁。

4）有足够的碱性。燃油燃烧后，生成的硫的化合物和水蒸汽，在温度低于露点时，会形成硫酸，使缸套和活塞环受到腐蚀。所以，润滑油结合的添加剂要有能中和硫酸的碱性，亦即有足够的总碱值。

5）有足够的抗磨损能力和极压性能，在重负荷下仍能保持有油膜，以减少缸套、活塞环、减速齿轮等的磨损。

常用的测定方法有：

（1）FIG 齿轮试验：该试验在 FIG 齿轮试验设备上进行。试验的齿轮是专门设计的，具有高度的“滑动”性能。齿轮试验方法是：将齿轮浸在油浴中，在固定温度下，以恒定的速度旋转，然后逐级往齿轮上增加负荷；每级运转时间是 15 min，每级完成后取出齿轮称重，

表 2.3.2-9 国外筒状活塞柴油机油性能

油公司	油名	SAE等级	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	硫酸盐灰分 (重量%)	粘度指数	闭口闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
AGIP	CLADIUM70-SAE30	30	0.890	110	12.0	7		98	235	−18	
	CLADIUM 70-SAE 40	40	0.900	168	16.0	7		98	245	−15	
	CLADIUM 120-SAE30	30	0.895	110	12.0	12		98	225	−18	
	CLADIUM 120-SAE40	40	0.900	168	16.0	12		98	235	−15	
	CLADIUM 250-SAE30	30	0.895	108	12.0	25		98	225	−18	达到API-CD水平
	CLADIUM 250-SAE40	40	0.900	164	16.0	25		98	235	−16	
	CLADIUM 350-SAE30	30	0.895	108	12.0	35		98	225	−18	
	CLADIUM 350-SAE 40	40	0.900	164	16.0	35		98	235	−16	
	EMD-SAE40	40	0.900	153.8	15.1	13		98	250	−9	适用于银轴承的EMD柴油机
BP	ENERGOL DL-MP30	30	0.908	114.4	11.5	9	1.2	85	254	−9	超过API-CC和MIL-L-46152水平和FZG齿轮试验10级水平
	ENERGOL DL-MP40	40	0.912	152.9	13.9	9	1.2	85	260	−9	
	ENERGOL DS3-20W	20 W	0.902	56	7.8	10	1.15	103	204	−24	
	ENERGOL DS3-30	30	0.903	128	12.3	10	1.15	83	231	−18	
	ENERGOL DS3-40	40	0.924	178	15.2	10	1.15	83	234	−9	
	ENERGOL DS3-153	30	0.914	120	11.7	15	2	83	234	−18	超过API-CD水平和达到FZG齿轮试验10级水平。
	ENERGOL DS3-154	40	0.925	155	13.9	15	2	84	236	−9	用于烧含硫量1%燃料油的筒状活塞柴油机。
	ENERGOL IC-HF303	30	0.932	118	11.5	30	4	81	230	−15	超过API-CD水平和达到FZG齿轮试验10级水平,用于烧渣油的筒状活塞柴油机。
	ENERGOL IC-HF304	40	0.935	155	13.9	30	4	83	246	−9	
	ENERGOL IC-HF404	40	0.940	153	13.9	40	5.2	85	250	−9	
CASTROL	MARINE MPX 20	20	0.885 (20℃)	65	8.3	9	1.1	101	210	−15	达到MIL-L-2104C和API-CD水平，用于烧船用柴油的高负荷筒状活塞柴油机
	MARINE MPX 30	30	0.885 (20℃)	103	11.5	9	1.1	98	210	−15	
	MARINE MPX 40	40	0.890 (20℃)	138	14	9	1.1	98	210	−9	

续上表

油公司	油名	SAE等级	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	硫酸盐灰分 (重量%)	粘度指数	闭口闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
CASTROL	MARINE MPX 50	50	0.890 (20℃)	190	17	9.2	1.1	95	210	−9	
	MARINE MLC 30	30	0.897	107	11.5	12	1.65	97	230	−18	达到 MIL-L-2104 C和API-CD水平，FZG齿轮
	MARINE MLC 40	40	0.898	137	14.0	12	1.65	97	235	−12	试验11级水平，用于烧低质柴油的筒状活塞柴油机。
	215 MX SUPER	30	0.895 (20℃)	103	11.5	16	2.2	98	210	−18	超过 MIL-L-2104 C和API-CD水平和齿轮试验11级
	220 MX SUPER	40	0.900 (20℃)	138	14.0	16	2.2	98	210	−12	水平，用于烧高硫船用柴油的筒状活塞柴油机。
	215 MXD	30	0.895 (20℃)	103	11.5	22	2.7	98	210	−15	超过MIL-L-2104 C, API-CD水平，齿轮试验11级
	220 MXD	40	0.895 (20℃)	138	14.0	22	2.7	98	210	−15	用于烧2.5%硫分燃油的筒状活塞柴油机。
	225 MXD	50	0.910 (20℃)	186	17.0	22		97	225	−15	超过MIL-L-2014 C.API-CD水平，齿轮试验11级水平，
	MXD 303	30	0.905 (20℃)	103	11.5	30	3.9	98	210	−15	用于烧4.0%硫分以上燃油的筒状活塞柴油机。
	MXD 304	40	0.900 (20℃)	138	14.0	30	3.9	98	210	−15	
	MXD 403	30	0.905 (20℃)	103	11.5	40	5.25	98	210	−15	远超过MIL-L-2104.API-CD水平，用于烧最劣质燃料油
	MXD 404	40	0.910 (20℃)	138	14.0	40	5.25	98	210	−15	的筒状活塞柴油机和作为十字头柴油机气缸油。
	DEUSOL RYS 40	40	0.900 (20℃)	191	14.6	10	1.0		237	−18	适用于EMD柴油机
	GTX	15 W/40	0.890	120	16.9	7	0.9	147	211	−24	用于应急设备的柴油机和汽油机
CHEVRON	DELO 3400 MARINE OIL SAE 30	30	0.920	104	11.7	40		101		−18	达到API-CD水平，通过
	DELO 3400 MARINE OIL SAE 40	40	0.920	151	15.1	40		100		−15	MWM-B试验和

续上表

油公司	油名	SAE等级	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	总碱值(mgKOH/g)	硫酸盐灰分(重量%)	粘度指数	闭口闪点(℃)	倾点(℃)	说明
CHEVRON	DELO 3000 MARINE OIL SAE 30	30	0.910	104	11.8	30		102	240	−18	FZG 齿轮试验9级，用于烧高硫燃料油的
	DELO 3000 MARINE OIL SAE 40	40	0.910	147	15.1	30		103	250	−12	筒状活塞柴油机和作为十字头柴油机气缸油
	DELO 2000 MARINE OIL SAE 30	30	0.900	106	12.0	20		102	245	−18	达到 API-CD的水平，通过MWM-B试验和FZG齿轮试验
	DEKO 2000 MARINE OIL SAE 40	40	0.910	151	15.1	20		100	250	−12	9级，用于烧硫分2.5%以下的燃料油的筒状活塞柴油机
	DELO 1000 MARINE OIL SAE 30	30	0.900	112	12.1	12		97	245	−18	达到API-CD的水平，通过FZG齿轮试验10级，
	DELO 1000 MARINE OIL SAE 40	40	0.910	159	15.1	12		95	250	−12	用于烧柴油的筒状活塞柴油机。
	DELO 6000 OILSAE 40	40	0.910	180	14.5	13		75	240	−15	用于EMD柴油机
	DELO 6200 OIL SAE 40	40	0.910	155	14.5	20		100		−15	
	DELO 100 MOTOR OIL SAE 20W-20	20W/20	0.890	68.7	9.0	5		104	230	−24	达到MIL-L-2104B和API CC水平，用于安全设备柴油机。
	DELO 100 MOTOR OIL SAE 30	30	0.890	112	12.2	5		98	250	−18	达到MIL-L-2104B和API CC水平，用于高负荷柴油机
	DELO 100 MOTOR OIL SAE 40	40	0.900	155	15.0	5		97	260	−12	
	DELO 300 MOTOR OIL SAE 20W-20	20W/20	0.890	69.4	9.1	10		105	220	−27	达到 MIL-L-2104 C，API CD水平，用于安全设备柴油机
	DELO 300 MOTOR OIL SAE 30	30	0.900	109	12.2	10		101	240	−21	达到 MIL-L-2104 C，API CD
	DELO 300 MOTOR OIL SAE 40	40	0.900	155	15.0	10		97	250	−15	水平，用于工作条件恶劣的高速
	CUSTOM MOTOR OIL	MULTI	0.880	90	14.0	9		160	210	−30	柴油机用于艇汽油机
ELF	DISOLA GM-3C 3008	30	0.895	110	12.0	8			240	−21	达到 MIL-L-2104 C 水平和FGZ齿轮试验
	DISOLA GM-3C 4008	40	0.900	150	15.0	8			250	−21	11级水平，适用于 GM DETROIT 柴油机

续上表

油公司	油名	SAE等级	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	硫酸盐灰分 (重量%)	粘度指数	闭口闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
ELF	ATLANTA MARINE DX 30	30	0.895	105	11.5	8.5			240	−12	达到 MIL-L-2104 B 和 FGZ 齿轮试验 10 级水平
	ATLANTA MARINE DX 40	40	0.900	150	14.7	8.5			250	−12	
	DISAL CF 112G	40	0.900	130	13.5	13			230	−9	适用于 EMD 柴油机
	DISOLA M 2015	20	0.890	70	9	15			230	−24	达到 MIL-L-2104 C 水平，用于安全设备
	DISOLA M3015	30	0.905	105	11.5	15			240	−24	达到 MIL-L-2104 C水平
	DISOLA M4015	40	0.905	150	14.7	15			250	−24	达到 MIL-L-2104 C 水平
	AURELIA 3030	30	0.910	115	11.5	30			240	−15	
	AURELIA 4030	40	0.915	150	14.7	30			255	−15	超过MIL-L-2104C水平
	AURELIA XT 3040	30	0.910	105	11.5	40			240	−21	
	AURELIA XT 4040	40	0.915	140	14.0	40			255	−21	
ESSO	EXXMAR 12TP30	30	0.898	110	12.0	12		98	252	−18	达到 API-CD 水平，烧柴油时用。
	EXXMAR 12TP 40	40	0.902	146	14.4	12		96	258	−12	
	EXXMAR 12TP 50	50	0.905	225	19.0	12		95	264	−9	达到 API-CD水平，烧低硫柴油作十字头柴油机气缸油
	EXXMAR 24TP 30	30	0.906	110	12.0	24		98	246	−18	
	EXXMAR 24TP 40	40	0.910	146	14.4	24		96	254	−12	
	EXXMAR 30TP 30	30	0.910	110	12.0	30		98	244	−18	达到API-CD 水平，烧燃料油时用
	EXXMAR 30TP 40	40	0.913	146	14.4	30		96	252	−12	
	EXXMAR 40TP 30	30	0.916	110	12.0	40		98	240	−18	
	EXXMAR 40TP40	40	0.919	146	14.4	40		96	250	−12	
	EXXMAR 40TP50	50	0.923	225	19.0	40		95	260	−9	达到 API-CD 水平，作烧低硫燃料油十字头柴油机气缸油
FEOSO	FEOGOD 30	30	0.890	109	11.8	8		96	210	−15	
	FEOGOD 40	40	0.893	143	14.2	8		96	220	−10	
	FEOMAR 30	30	0.892	115	12.0	12		94	210	−15	
	FEOMAR 40	40	0.898	146	14.1	12		94	220	−10	
	SULMAR 30	30	0.901	109	11.8	30		96	210	−15	
	SULMAR 40	40	0.903	143	14.2	30		96	220	−10	

续上表

油公司	油名	SAE等级	相对密度 (15.5°C)	运动粘度 40°C mm²/s	运动粘度 100°C mm²/s	总碱值 (mgKOH/g)	硫酸盐灰分 (重量%)	粘度指数	闭口闪点 (°C)	倾点 (°C)	说明
MOBIL	MOBILGARD 300	30	0.890	109	12.0	6.1	0.85	97	227	−12	达到 API-CD 水平，适用于烧含硫
	MOBILGARD 312	30	0.895	110	12.0	12		95	219	−18	
	MOBILGARD 412	40	0.900	145	14.4	12		95	227	−12	量低于1.5%的柴油的筒状活塞
	MOBILGARD 512	50	0.903	222	19.2	12		95	230	−4	柴油机作气缸、轴承润滑油
	MOBILGARD 324	30	0.911	114	12.5	30	4	95	232	−18	超过 SERIES Ⅲ 的水平，适用于烧含硫量达到
	MOBILGARD 442	40	0.915	152	14.0	30	4	95	238	−15	3%燃料油的大功率增压柴油机润滑油
	MOBILGARD 342	30	0.915	109	11.2-12.4	40	5.2	100	218	−18	高于前述的油的水平，适用于烧高硫燃料油
	MOBILGARD 442	40	0.920	135	13.6-15.1	40	5.2	100	227	−12	机油耗量低、气缸温度低的柴油机
	MOBIL SUPER SAE 15W-50	15W-50	0.888	143	20.5		0.95	165	204	−26	用于应急设备柴油机
	MOBILGARD 446	40	0.900	166	14.8	10	1.1	95	260	−12	用于有银轴承的 EMD 柴油机
SHELL	MELINA OIL 30	30	0.897	104	11.8	8		102	227	−18	超过MIL-L-2104B 水平，适用于烧柴油要求润
	MELINA OIL 40	40	0.900	139	14.4	8		102	229	−9	滑油性能低于 MIL-L-2104B 的筒状活塞柴油机
	GADINIA OIL 30	30	0.897	104	11.8	12		102	227	−18	达到 API-CD 水平，适用于烧柴油的高增压
	GADINIA OIL 40	40	0.900	139	14.4	12		102	229	−18	中速筒状活塞柴油机
	GADINIA MULTIGRADE		0.866	67.6	10.8	9		150	188	−33	达到 API-CD 水平，用于安全设备

油公司	油名	SAE等级	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃	运动粘度 100℃	总碱值 (mgKOH/g)	硫酸盐灰分 (重量%)	粘度指数	闭口闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
				mm²/s							
	RIMULA OIL 30	30	0.916	124	10.8	16		58	232	−24	性能超过SERIES Ⅲ 和MIL-L-45199B, 适用于高
	RIMULA OIL 40	40	0.916	182	14.4	16		70	238	−21	增压工作条件艰巨烧柴油的筒状活塞柴油机
	ARGINA S OIL 30	30	0.904	100	11.4	20		102	227	−18	达到 API CD 和FZG 齿轮试验11级水平,用于烧含硫量2.5%以下燃料油的柴油机
	ARGINA T OIL 30	30	0.901	104	11.8	30		102	212	−18	性能超过上列油,用作烧燃料油的中速筒状
	ARGINA T OIL 40	40	0.913	139	14.4	30		102	211	−18	活塞柴油机作气缸和曲柄箱润滑油。
	ARGINA X OIL 40	40	0.921	145	14.6	40		99	205	−27	性能超过上列油,用于烧高硫燃料油低机油耗量的柴油机。
	DILOMA OIL	40	0.920	168	15.3	40		91	216	−9	用于需要这类油的筒状活塞柴油机和三菱 UE 型柴油机气缸油
TEXACO	DORO AR 30	30	0.895	118	12.1	6	0.78	87	255	−10	
	TARO XD 30	30	0.923	122	11.2	16	1.9	70	240	−15	
	TARO XD 40	40	0.927	174	14.0	16	1.9	70	240	−10	
	TARO DP 30	30	0.924	122	11.2	32	3.6	70	230	−15	
	TARO DP 40	40	0.931	174	14.0	32	3.6	70	235	−10	
	URSA OIL ED 30	30	0.890	114	12.1	5	0.9	95	235	−22	达到 API-CC 和MIL-L-2104B 水平
	URSA OIL ED 40	40	0.897	172	15.3	5	0.9	38	245	−18	
	URSA SUPER LA30	30	0.908	105	11.8	7	1	92	240	−22	
	URSA SUPER LA 40	40	0.912	165	15.6	7	1	92	245	−18	达到 API-CD 和 MIL-L-2104C 水平
	URSA SUPER PLUS 30	30	0.894	108	12.1	7	0.94	100	235	−22	
	URSA SUPER PLUS 40	40	0.901	160	15.1	7	0.94	94	240	−18	
	TARO 4-80 30	30	0.913	118	11.6	10.2	1.6	84	245	−15	
	TARO 4-80 40	40	0.923	185	14.9	10.1	1.6	74	245	−12	

以能达到的级别表示其性能达到的水平。

(2)四球装置：这套装置中，有一个单独的钢球。这一钢球在负荷作用下，与其它三个固定的球接触，试验的油用来润滑接触点。试验时，机器每次运转 10 s，连续增加负荷，直到发生相咬现象。这时钢球接触点之间已经烧结，其负荷的大小用来确定油的抗磨损和极压性能。

(3)FALEX-FAVILLE 装置：这套装置有一根垂直安装的直径为 6.35 mm的钢轴，由电动机带动，另有两个V形块，用来夹持该钢轴。这些零件被试验的油所润滑。试验时，逐步向V形块加负荷，直到V形块将转动的钢轴咬住为止，其负荷的大小用来确定油的抗磨损和极压性能。

此外，还有 TIMKEN 试验机，SAE试验等，都用来测试这项性能。各种试验机互相之间没有关联，对不同添加剂的润滑油有各自的倾向性，有时要分别进行试验。

6)有良好的抗腐蚀能力，以保护轴承、轴颈不受腐蚀。

该试验通常是将钢合金、铅、磷、青铜、铝、锡等金属片，分别悬浮地放在装有一定数量的试验油的烧杯内，在一定温度下保持恒温 100 h，然后，检查金属试样的腐蚀情况；另外，还需将 30 ml的蒸馏水或合成海水放到 300 ml试油中，保温 60℃，将抛光过的钢棒放入其中进行试验，经过一段时间后取出钢棒，观察其被腐蚀的情况。

7)能与凝结水和污染的水迅速分离，其添加剂有抗水能力，遇到水分时不至于分解。

8)要有良好的过滤性，即添加剂遇到水污染和高温作用时，其生成物不会堵塞过滤器。

上列要求是这种油用作大型筒状活塞柴油机油的要求。当油应用的场合不同，这些要求的侧重点有所变化。用于应急设备的油，对冷机起动和减少冷泥渣方面有更高的要求。

国内外，各种筒状活塞柴油机油的性能资料如表 2.3.2-9 至表 2.3.2-11 所示。

表 2.3.2-10 **国产增压柴油机油质量指标**

项目	11 号低增压柴油机油	14 号低增压柴油机油	14 号增压柴油机油	14 A中增压柴油机油	40 号中增压柴油机油	14 号中增压柴油机油	试验方法
运动粘度 (mm^2/s) (100℃)	10～12	14～16	14～16	14～16	12.5～16.0	13.5～16.3	GB265
粘度指数 不小于	实测	实测	实测	90	90	90	GB1995
闪点，开口 (℃) 不低于	200	210	210	210	220	230	GB267
凝点 (℃) 不高于	−15	−5	−20	−5	−10	−10	GB510
水分 (%) 不大于	痕迹	痕迹	痕迹		痕迹	痕迹	GB260
机械杂质 (%) 不大于	0.03	0.03	0.03				GB511
总碱值 (mgKOH/g)	6～15	6～15	实测				SY2455
灰分，未加添加剂 (%) 不大于			0.025		实测	实测	GB508
加添加剂 (%)			实测				GB508
残炭，未加添加剂 (%) 不大于			0.3		0.01		GB268

续上表

项　　目	11号低增压柴油机油	14号低增压柴油机油	14号增压柴油机油	14A中增压柴油机油	40号中增压柴油机油	14号中增压柴油机油	试验方法
氧化安定性总分（分）不大于			实测	4.7		50	SY2681
曲柄箱模拟试验 320°C，6h				2.5			
PETTER W-1轴瓦失重 mg 不大于				25			
PETTER AVB发动机试验，评分			实测	报告			
最大无卡咬负荷 P_B（N）						实测	
抗泡试验 93°C（ml/ml）						实测	SY2665
钙含量（%）					实测	实测	
硫含量（%）					实测	实测	
锌含量（%）	实测	实测			实测	实测	SY2661
钡含量（%）	实测	实测					SY2658
企业标准编号	甘Q/SY8053/79	甘Q/SY8053/79	Q/SY11031-80				

注：国产增压柴油机油的清洁-分散性能达到API—CC的水平。

表 2.3.2-11　　国产稠化柴油机油质量指标

项目及指标 \ 标准及牌号	Q/SY11517-79 14号寒区 稠化机油	Q/SY11516-79 14号严寒区 稠化机油
运动粘度，（mm^2/s）		
100°C　不小于	13.5	13.5～14.5
0°C　不大于		—
−20°C　不大于	4500	3200
−30°C　不大于	—	12000
酸值（未加添加剂）（mgKOH/g）　不大于	0.1	0.1
凝点（°C）　不高于	−35	−58
闪点，开口（°C）　不低于	140	148
水分（%）　不大于	痕迹	痕迹
机械杂质（%）　不大于	0.01	0.01
腐蚀度，（g/m^2）　不大于	10	10

3.3　使用中注意事项

1)作为主机用油时，注意事项与第2节十字头柴油机油的使用中注意事项基本相同，但分油操作要求在20%～25%的额定流量下进行，分油温度应保持85～90°C，切不可低于80°C。

2)作为发电柴油机用油时，需注意：

(1)运转中循环系统中各处的压力、温度和循环油柜或油底壳油位要保持在规定范围内。高压油泵下部的放泄油管路要保持畅通。

(2)运转中坚持使用旁通过滤器（如果已安装的话），其滤芯要按期更换。

(3)机油循环系统中的过滤器、机油冷却器、循环油柜或油底壳要定期清洁或试压。

(4)发动机停止运行时，如有机油沉淀柜，应将油驳至沉淀柜内，且保温60～70°C，沉

表 2.3.2-12　我国CC-柴油机油（API-CC水平）质量指标　（参照SAEJ183-CC）

项目	质量指标						试验方法
	5 W/30	10 W/30	15 W/40	20/20 W	30	40	
运动粘度，100℃（mm^2/s）	9.3～小于12.5	9.3～小于12.5	12.5～小于16.3	5.6～小于9.3	9.3～小于12.5	12.5～小于16.3	GB 265
低温粘度（℃）CP　不大于	−25 3500	−20 3500	−15 3500	−10 4500	—	—	GB6538
最大边界泵送温度（℃）　不高于	−30	−25	−20	−15	—	—	ASTM D3829
粘度指数　不低于	—	—	—	—	76	80	GB1995
闪点，开口（℃）　不低于	180	205	215	215	220	230	GB3536
倾点（℃）　不高于	−40	−23	−23	−18	−13	−10	GB3535
抗泡沫性（ml）　不大于							SY2669
24±0.5℃	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	
93±0.5℃	150-0	150-0	150-0	150-0	150 0	150-0	
后 24±0.5℃	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	
残炭（未加剂前）	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB268
硫酸盐灰分	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB2438
硫含量	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB387
磷含量	报告	报告	报告	报告	报告	报告	SY2676
有机金属含量（Ca，Ba，Zn）	报告	报告	报告	报告	报告	报告	ASTM D811
剪切安全性试验 100℃粘度	不超过原等级油规定						L-38运转 10 h后油样
轴承腐蚀试验	轴瓦失重　最大 50 mg						FTMS791B
高温清净试验　1 H2	活塞裙部漆膜　评分最小 9.0						FTMS405.1
	（1）顶环槽积炭　最大 45%（体积）						FTMS791B
	（2）加权总评分　最大 140						FTMS405-B
机械杂质　不大于	0.01						GB6531
水分　不大于	痕迹						GB260

表 2.3.2-13　我国CD-柴油机油（API-CD水平）质量指标　（参照SAEJ183-CD）

项　　目	质量指标								试验方法
	10 W	5 W/30	10 W/30	15 W/30	20/20 W	15 W/40	30	40	
运动粘度，100℃（mm^2/s）	5.6～小于 7.4	9.3～小于 12.5	9.3～小于 12.5	9.3～小于 12.5	7.0～小于 9.3	12.5～小于 16.3	9.3～小于 12.5	12.5～小于 16.3	GB 265
低温粘度（℃）CP 不大于	−20 3500	−25 3500	−20 3500	−15 3500	−10 4500	−15 3500	—	—	GB6538
边界泵送温度（℃）不高于	−25	−30	−25	−20	15	20	—	—	ASTM D-3825
粘度指数　不低于	—	—	—	—	—		75	80	GB1995
闪点，开口（℃）　不低于	200	180	205	215	215	215	220	230	GB3536
倾点（℃）　不高于	−35	−40	−23	−23	−18	−23	−13	−10	GB3535
抗泡沫性（ml）　不大于									SY2669
24±0.5℃	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	
93±0.5℃	150-0	150-0	150-0	150-0	150-0	150-0	150-0	150-0	
后 24±0.5℃	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	25-0	
残炭（加剂前）	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB268
硫酸盐灰分	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB2433
硫含量	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB387
有机金属含量	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	报告	ASTM D811
轴承腐蚀试验	轴承失重，mg，不大于　50								FTM S791B
	活塞裙部漆膜，不小于　9.0								FTM 3405.1
机械杂质（%）	0.01								GB6531
水分　（%）	痕迹								GB260
IG2 试验	顶环槽积炭　%容积　不大于 80								FTM S791B
	活塞环侧间隙损失　mm　最大　0.0005（0.013）								FTM 341
	加权总评分　300								
剪切安定性试验，100℃粘度	不超过原等级油规定								L-38 运转 10 h后油样

淀一段时间（不少于24 h）后，放去水和污物。如果机油沉淀柜与机油分油机有管路相通，则应当进行分油。

（5）检修发动机时，要注意防止水和污物进入曲柄箱。

（6）如果说明书规定要定期换油，则需按期更换；如果没有规定，要定期取油样化验，一旦发现问题，应及时采取措施。

（7）循环油柜或油底壳的油位和每次补入新油的数量都要记录。

第3章　其它润滑油

1　汽轮机油

汽轮机油亦称透平油、涡轮机油。

1.1　汽轮机油的用途

（1）作为船用汽轮主机的轴承润滑油及其减速齿轮箱的润滑油。

（2）作为带动发电机、锅炉给水泵、货油泵的汽轮原动机及其减速齿轮的用油和离心式空气压缩机、离心式冷藏压缩机、鼓风机的轴承润滑油。

（3）作为柴油机废气涡轮增压器的轴承润滑油。

（4）作为闭式蒸汽机的润滑油。

（5）作为一些对粘度指数和极压性要求不高的液压系统用油。

（6）当主机为船用汽轮机时，作为机舱的液压系统用油；作为中间轴轴承、SIMPLEX 和 WAUKESHA 尾轴轴封、液压舵机油泵等的润滑油。

1.2　对汽轮机油的要求

1）有良好的抗氧化安定性。汽轮机的转速高，产生的摩擦热量多，而且蒸汽温度有的高达500℃。如此高温会促使油氧化。油氧化后，溶于油的一部分氧化产物会使酸值增加。当酸值增加到一定量或有低分子酸出现时，会腐蚀金属；另一部分不溶于油的氧化产物则生成油泥和沉淀物析出，影响热传导，堵塞油管。

要使油有良好的抗氧化安定性，一方面是基础油必须经精制和处理，另一方面是结合抗氧剂。检验油抗氧化安定性水平的试验方法，是将试油在一定温度下连续供氧，看其酸值达到2.0 mgKOH/g 要多少小时。这个试验是 ASTM D 943 和 IP 280 试验方法。

2）有良好的抗腐蚀能力，能防止海水、淡水和酸性的氧化产物对金属的腐蚀。为达到此目的，要在油中放入防腐蚀添加剂。

检查抗腐蚀能力达到的水平在 ASTM D 665 试验法中有规定。将30 ml 蒸馏水或合成海水加入到300 ml 试验油内并加以搅拌，保持温度60℃，将经过抛光的钢棒放入其中，经24 h 后，取出观察其锈蚀情况。

3）有良好的抗乳化性，能避免油乳化或油乳化后能迅速分离水。

检查抗乳化性的方法是：将油和水搅拌一段时间，使其保持在一定温度内，然后停止搅拌，以观察油和水分离的时间。

4）有良好的抗泡性。泡沫的形成会使润滑不正常，因此，油中放入了抗泡沫添加剂。

通过抗泡沫试验，测定在一定温度下的泡沫倾向和安定性。另外，有的还要试验在50℃下放出空气的时间。

5）有承载负荷的能力。当汽轮机油要用来作为减速齿轮箱润滑油时，油中要放入极压添加剂，以提高油的承载能力和减少齿轮的磨损。由于不是所有汽轮机油都放入了极压添加剂，所以在选择汽轮机油时要特别注意。

国内外各种船用汽轮机油的性能资料见表 2.3.2-1、表 2.3.2-2 和表 2.3.3-3。

表 2.3.3-1 **国外船用汽轮机油性能**

油公司	油　名	ISO 级别	相对密度（15.5℃）	运动粘度		中和值（mg·KOH/g）	粘度指数	闪点 ℃	倾点 ℃	说　明
				40℃	100℃					
				mm²/s						
AGIP	OTE 68	68	0.875	64	8.6		107	230	−10	
	OTE 100	100	0.880	80	9.9		103	240	−10	
BP	ENERGOL THB 68	68	0.881	65	8.4	0.15	99	219	−9	破乳化值(IP 19)：小于 120 s，空气释放(50℃XIP 313)小于 5 min，
	ENERGOL THB 77		0.882	77	9.4	0.15	98	227	−9	防锈试验(IP 135)：无氧化试验(氧化稳定总小时)超过 3000 h。
	ENERGOL THB 100	100	0.884	96	10.8	0.15	96	249	−9	氧化稳定性(IP 280)：通过，抗泡沫试验：良好，
CASTROL	PERFECTO T-32	32	0.865	32	5.3	0.2	96	207	−9	
	PERFECTO T-68	68	0.875	64	8.6	0.2	96	225	−9	通过 1 P和 ASTM的防锈试验和氧化试验
	PERFECTO T-100	100	0.880	96	10.8	0.2	96	225	−9	
CHEVRON	GST OIL 68	68	0.880	68	9.0		107	230	−18	按照ASTMD-943 进行氧化稳定试验，
	GST OIL 100	100	0.880	100	11.6		104	240	−15	超过 3000 h，TURBINE OIL 105 TEP 100
	TURBINE OIL 105 TEP 100		0.880	105			98	240	−12	含有极压添加剂。
ELF	TURBINE T 68	68	0.890	71	9.0			245	−12	
	TURBINE T 100	100	0.890	95	10.7			245	−12	
ESSO	TROMAR T		0.876	76	9.5		103	236	−6	
	TROMAR TEP		0.876	76	9.5		103	236	−6	含有极压添加剂
FEOSO	TURSO 32	32	0.870	32	5.4		105	200	−15	
	TURSO 46	46	0.880	46	6.8		102	205	−15	
	TURSO 68	68	0.885	68	8.8		102	205	−15	
	TURSO 100	100	0.890	100	11.2		100	210	−10	
MOBIL	MOBIL DTEOIL LIGHT	32	0.871	27.8/32.0	5.3	0.20	100	201	−7	
	MOBIL DTEOIL MEDIUM	46	0.876	41.4/46.0	6.5	0.25	100	201	−7	
	MOBIL DTEOIL HEAVY MEDIUM	68	0.879	61.2/68.0	8.6	0.30	100	204	−7	通过防锈试验和破乳化试验
	MOBIL DTEOIL HEAVY	100	0.882	90/100	11.4	0.30	100	210	−7	
	MOBIL DTEOIL EXTRAHEAVY	150	0.887	130/150	13.1	1.2	95	227	−4	
	MOBIL DTEOIL BB	220	0.890	198/220	18.0	1.2	95	227	−4	

续上表

油公司	油　　名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	中和值(mg·KOH/g)	粘度指数	闪点℃	倾点℃	说　　明
MOBIL	MOBIL DTEOIL AA	320	0.897	288/320	25	1.2	95	238	−4	
	MOBIL DTEOIL HH	460	0.900	414/460	318	1.2	95	271	−4	
SHELL	TURBO OIL T 46	46	0.873	46	6.8		99	228	−6	
	TURBO OIL T 68	68	0.873	68	8.7		98	237	−6	
	TURBO OIL T 78		0.879	78	9.5		96	240	−6	
TEXACO	REGAL OIL R&O 32	32	0.868	29.0	6.2		106	204	−34	
	REGAL OIL R&O 46	46	0.873	42.10	6.5		101	218	−26	
	REGAL OIL R&O 68	68	0.878	64.7	8.3		96	213	−23	
	REGAL OIL R&O 100	100	0.882	91.7	10.3		93	224	−12	
	REGAL MARINE 100	100	0.887	103.0	10.9		88	243	−12	
	REGAL R&O N 68	68	0.903	64.20	6.6		16	204	−29	
	REGAL R&O N 100	100	0.912	93.2	8.5		39	207	−23	

表 2.3.3.2　　国产汽轮机油标准(GB 2537—81)

项　目 ＼ 质量指标		HU-20	HU-30	HU-40	HU-45	HU-55	试验方法
运动粘度 50℃ (mm²/s)		18-22	28-32	37-43	43-57	53-57	GB 265
酸值(mgKOH/g)未加添加时，不大于		0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	GB 264
闪点（开口）(℃)	不低于	180	180	180	195	195	GB 267
凝点(℃)	不高于	−15	−10	−10	−10	−5	GB 510
灰分(%)	不大于	0.005	0.005	0.01	0.02	0.03	GB 508
水溶性酸碱		无	无	无	无	无	GB 259
机械杂质		无	无	无	无	无	GB 511
透明度，5℃		透明	透明	透明	透明	透明	
氢氧化钠抽出物酸化级	不大于	2	2	2	2	2	SY 2651
破乳化时间(S)	不大于	8	8	8	8	8	SY 2610
氧化安定性酸值至 2.0 mgKOH/g h	不大于	1000	1000	实测	实测	实测	SY 2680

注：凝点指标根据生产和使用实际情况，经与用户协商，可不受本标准限制；但供军用时均按标准执行。

表 2.3.3.3　　国产防锈汽轮机油标准(SY 1230—83)

项目		质量指标				试验方法
		N 32	N 46	N 68	N 100	
运动粘度，40℃ (mm/s²)		28.8～35.2	41.4～50.6	61.2～74.8	90.0～110.0	GB 265
粘度指数	不小于	90	90	90	90	GB 1995 ①
倾点(℃)	不高于	−7	−7	−7	−7	GB 3535 ②
闪点（开口）(℃)	不低于	180	180	195	195	GB 267
灰分(未加剂)(%)	不大于	0.005	0.005	0.005	0.005	GB 508
酸值(mgKOH/g)	不大于					
加剂前		0.03	0.03	0.03	0.05	
加剂后		0.3	0.3	0.3	0.3	
机械杂质(%)		无	无	无	无	GB 511
水分(%)		无	无	无	无	GB 260
破乳化时间 54℃ (min)	不大于	15	15	30	30	SY 2683
抗泡沫试验，ml，泡沫倾向/安定性	不大于					SY 2669
24±0.5℃	不大于	600/0	600/0	600/100	600/100	
93±0.5℃		100/0	100/0	100/25	100/25	
24±0.5℃		600/0	600/0	600/100	600/100	
氧化安定性(酸值达 2.0 mgKOH/g)h，不大于		1500	1500	1500	1000	SY 2680
液相锈蚀试验(15 号钢棒)						SY 2674
蒸馏水　24 h		无锈	无锈	无锈	无锈	
合成海水　24 h		无锈	无锈	无锈	无锈	
透明度		透明	透明	透明	透明	

① 对中间基原油生产的防锈汽轮机油，粘度指数允许不低于 70。

② 倾点指标，根据生产和使用实际，经与用户协商，可不受本标准限制。

1.3 使用中注意事项

汽轮机油用作汽轮主机润滑油时，需注意

(1)主机运转中循环系统各处的压力、温度和循环油柜油位要保持在规定的范围内。

(2)循环系统中的过滤器、冷却器、循环油柜按规定时间进行清洁或试压。

(3)主机运行时，分油机必须连续旁通净化循环系统的汽轮机油，按分油机说明书正确选择调节环(比重环)，分油温度应保持在 60～70℃ 范围内，选取低于⅔的额定流量来分油(视油的清洁情况增减流量)。要定期排渣和清洗分油机。

(4)停泊时，将全部汽轮机油驳送入机油沉淀柜(又称再生柜)，保温 60～70℃，静止存放一段时间后(不少于 24 h)，从泄放阀放走底部的水和污染物。主机起动前，用分油机连续将汽轮机油净化后，驳送回循环油柜。

(5)定期取油样化验，发现问题及时采取措施。

(6)循环油柜的油位和每次补入新油的数量都要记录。

汽轮机油作为发电机、锅炉给水泵、货油泵的汽轮原动机的用油时，由于设备上的限制，其工作条件比大型主汽轮机中恶劣，使用时应注意：

(1)检查油底壳的油位，应随时补充至规定的位置，并作记录。

(2)检查油底壳中是否有水分，若有，应除去。

(3)检查轴承中的油环是否正在转动。

(4)检查轴承的温度和震动情况。

(5)听噪声是否有增强。噪声增强说明油环或滚动轴承发生了故障。

(6)检查冷却水的循环情况。

(7)原动机停下来时，循环油柜如跟分油机有管路相通，应当进行分油。

(8)如果说明书规定要定期换油，则需按期更换。如果没有规定，要定期取油样化验，发现问题及时采取措施。

(9)过滤器、冷却器、油底壳要定期清洁或试压。

2 蒸汽汽缸油

由于蒸汽机逐渐被淘汰，汽缸油的品种也逐步减少了。

蒸汽汽缸油的应用情况如下：

(1)作为蒸汽机汽缸和汽室滑阀的润滑油，应按蒸汽温度进行选择，但有时则按减少锅炉被油污染的原则，来选择合适的汽缸油。

(2)带动起锚机、起货机、绞缆机等甲板机械的往复蒸汽机，其用油情况得根据设备情况而定，有的设备不需润滑汽缸，仅需用刷子将少许汽缸油涂在活塞杆上，以防止海水腐蚀。有的设备则用油杯将油滴入，进行定量润滑。

(3)锅炉给水泵和其它蒸汽往复泵，其用油情况应根据设备情况而定。有的设备通常不必润滑，仅需用刷子将少量汽缸油涂在活塞杆上。其用油量要严加控制，以防止污染锅炉。有的设备，则用油杯将油滴入进行定量润滑。

(4)作为封闭齿轮箱或蜗轮蜗杆传动装置的用油，以减少用油的品种。

对蒸汽汽缸油的基本要求是：

(1)保护金属表面不受腐蚀；

(2)抵抗汽缸内蒸汽和水的冲洗，有足够的油膜强度；

(3)有良好的抗氧化能力；

(4)有高度的化学稳定性，在高温下不易分解而生成残炭。

对矿物汽缸油，要求有良好的抗乳化性能，易和水分离。

国内外各种蒸汽气缸油的性能见表 2.3.3-4、表 8.3.3-5

表 2.3.3-4 国外各种蒸汽汽缸油性能

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 mm²/s 40℃	运动粘度 mm²/s 100℃	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	说明
B P	ENERGOL DC 460	460	0.900	420	29.0	95	271	−9	可在蒸汽温度达260℃时作蒸汽汽缸油，黑色
CASTROL	CRESTA LP		0.950(20℃)	1500	36		261	0	在湿蒸汽下作蒸汽汽缸油
	CRESTA SHS		0.920(20℃)	1000	44	80	260	−9	在过热蒸汽下作蒸汽汽缸油
CHEVRON	CYLINDER OIL(UNCOMP.) 460	460	0.930	460	27.1	81		−18	
ELF	POLYTELIS 460	460	0.900	460	30.0		295		

续上表

油公司	油　名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	说　明
MOBIL	600 W CYLINDER OIL		0.901	375	29.0	99	281	4	用于封闭蜗轮传动箱，蒸汽汽缸，联轴器和压缩机汽缸跑合。
	600 W SUPER CYLINDER OIL	460	0.900	465	31.7	95	281	4	与上列用途相同，但可用于负荷，温度更高的范围。
	EXTRA HECLA SUPER CYLINDER OIL	680	0.905	680	40.7	95	296	4	
	600 W SUPER CYLINDER OIL MINERAL		0.900	550	34.8	95	288	4	可在蒸汽温度达290℃时作蒸汽汽缸油，易与水分离。
SHELL	VALVATA OIL 460	460	0.897	460	31	96	271	−9	适用于高温高压汽缸和封闭齿轮箱，易与水分离。

表 2.3.3-5　　国内蒸汽汽缸油性能

项　目		饱和汽缸油 GB 448—64 HG-11	饱和汽缸油 GB 448—64 HG-24	过热汽缸油 GB 447—77 HG-38	过热汽缸油 GB 447—77 HG-52	合成汽缸油 SY 1203—77 HG-65 H	试验方法
运动粘度 100℃ (mm²/s)		9～13	20～28	32～44	49～55	—	GB 265
恩氏粘度，100℃　(°E)						8.0—9.5	GB 266
闪点（开口），(℃)	不低于	215	240	290	300	320	GB 267
凝点　(℃)	不高于	5	15	10	10	—	GB 510
酸值(mgKOH/g)	不大于	0.25	—	—	—	—	GB 264
残炭(%)	不大于	0.8	2.0	2.5	3.0	4.0	GB 268
水溶性酸和碱		无	无	无	无	无	GB 259
灰分(%)	不大于	0.02	0.03	0.015	0.01	0.035	GB 508
机械杂质(%)	不大于	0.007	0.1	无	0.01	0.02	GB 511
水分(%)	不大于	痕迹	0.05	0.05	0.05	0.05	GB 260

注：11 号饱和汽缸油：用于使用 0.5 MPa，温度 150℃ 以下的饱和蒸汽的蒸汽机和往复泵以及中等负荷，滑动速度 10～15 m/s的蜗轮蜗杆传动装置。

24 号饱和汽缸油：用于使用 0.5～16 MPa，温度 150℃～200℃ 的饱和蒸汽的蒸汽机和往复泵以及重负荷，滑动速度 3 m/s的蜗轮蜗杆传动装置和重型机械减速器。

38 号过热汽缸油：用于使用温度 300℃ 左右的过热蒸汽的活塞式蒸汽机。

52 号过热汽缸油：用于使用温度 320～400℃ 的过热蒸汽的活塞式蒸汽机。

65 号合成过热汽缸油：用于高温(400℃)高压过热蒸汽的蒸汽机。

3　蒸汽机油(尾轴管油)

开式蒸汽机已被淘汰。而闭式蒸汽机的机油循环系统则使用汽轮机油，因此，开式蒸汽机油用得很少，现在主要用在：

1)作为某些尾轴管封密的用油

旧式尾轴管用铁梨木、橡皮或塑料作为轴承材料，以支持带有铜套的尾轴。尾轴轴承分为前后两段，轴承没有密封，海水从舷外流入进行润滑。有时两段轴承之间的尾轴管空间充以钙基润滑脂，以保护尾轴不受海水侵蚀。现在尾轴管普遍密封和采用白合金轴承，该轴承要用油来润滑。但其尾轴管密封结构形式不同，对 SIMPLEX 和WAUKESHA 尾轴管密封，

可用主机机油来润滑，以减少润滑油的品种。对有海水流入的 Cederavall 和 Newark 尾轴管密封，应当用尾轴管油来润滑。这种油结合了乳化剂和抗腐蚀添加剂，遇到海水时，则形成乳化油把海水从金属表面排走，使轴承表面保持润滑油膜而不受腐蚀。

2)作为防摇鳍的滑块和导板之间的润滑油

当防摇鳍往舷外伸出时，其滑块在导板上移动，这些部位有海水存在，因而用尾轴管油润滑。

尾轴管油(包括主机机油作尾轴管密封润滑油)一般放在机舱重力柜内。重力柜设置在机舱上层，有时还有高、低位重力柜，利用重力往尾轴管供油。尾轴在转动时，将油带回重力柜，形成循环。系统下部还有排放阀。每天要检查重力柜的油位变化情况，及时补充油，还要定期打开排放阀检查和放水。

SIMPLEX 尾轴管密封正常时，重力柜油位基本上不下降或下降很少。但如果螺旋桨绞进了缆索鱼网之类的东西，密封就会失效，空船时往外漏油，污染海面，满载时往内漏水，影响尾轴润滑。严重时每天漏油，可达数百公斤。这时应当修理，或者通过水下作业把绞进的东西取出，或者是进坞换密封。在未能修理以前，可以通过换用高低重力柜增减调整油和海水的压头（有时在机舱高层临时用大油桶接管作油柜代替原来的重力柜来变化油柜的高度)。以减少漏油或漏水；这时如结合改用高粘度润滑油(高于常用的粘度等级为 SAE 30 的主机机油)，可以进一步减少漏油，使尾轴坚持运转一段时时间，直到修理。

国外各种蒸汽机油和尾轴管油见表 2.3.3-6。

表 2.3.3-6　　国外蒸汽机油和尾轴管油性能

油公司	油　名	ISO 级别	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃	运动粘度 100℃	粘度指数	闪点 (℃)	倾点 (℃)	说　明
				mm²/s					
AGIP	MUD 220	220	0.938	206	12.8		230	−15	
	MUD ST		0.938		16.7		212	6	
BP	ENERGOL ME-CC 220	220	0.916	230	17.5	79	243	−9	开式蒸汽机润滑油，只能用油壶注油器往润滑部位供油不能作循环系统油，可用于以重力供油的尾轴管密封润滑，如Cedervall 尾轴管密封。
	ENERGOL STERN TUBE MEDILOM		0.933	225	16.0	71	216	9	用于需乳化油和用泵供油的尾轴管润密封的润滑。
CASTROL	MARINE STEAM ENGINE OIL		0.930	222	14.0	33	219	−12	开式蒸汽机润滑油也可用于某些尾轴密封的润滑。
	CORAL 2		0.930	222	14.0	33	219	−12	用于Cedervall、Waukesha 和 Simplex 尾轴管密封的润滑
	CORAL D		0.900	254	14.1	10	213	0	用于 Newark 尾轴管密封润滑。
CHEVRON	MARINE OILX (COMPOUMD)	220	0.950	220	17.0	79	220	−18	开式蒸汽机润滑油，也用于Cedervall 尾轴管密封的润滑。
ELF	CEDERIA 51		0.975					12	
ESSO	STER-MAR 220	220							用于 Cedervall、Vicker 或 Newark 尾轴管密封润滑

续上表

油公司	油　名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 mm²/s 40℃	运动粘度 mm²/s 100℃	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	说　明
MOBIL	VOCO ENGINE OIL #1 VOCO ENGINE OIL SPECIAL STERN TUBE LUBRKANT								用于开式蒸汽机 用于尾轴管密封润滑。
SHELL	STROMBUS OIL L 320	320	0.954	320	20.0		196	−18	开式蒸汽机润滑油，也可用于要求乳化油的尾轴管密封的润滑。
	K 680	680	0.959	680	24.0		207	12	

4　液压油

液压油亦称压力油。液压油的品种非常多，在船舶轮机中得到广泛应用。

4.1　液压油的种类和用途

1)在要求不高，压力、温度变化不大的液压系统中，可以使用汽轮机油作液压用油。

2)粘度指数在 100 上下的液压油，可用于液压起锚机、起货机、绞缆机、防摇器、舵机、货舱盖、应急消防泵、调速器、可变螺距螺旋桨、舱底阀液压开关系统、操舵液压系统、水密门、天窗等动力传送液压系统或操纵系统的用油。但其中低粘度液压油(ISO 5、ISO 10、ISO 15、ISO 22、ISO 32)多数用于操舵液压系统；而高粘度液压油(ISO 220，ISO 320)，则用于重负荷设备，如液压起锚机等。这些结合了极压添加剂的液压油，也可用于减速齿轮箱作为齿轮箱油使用。这类液压油属于抗磨液压油。

3)粘度指数在 150 上下的液压油。这类油结合了粘度指数改进剂，粘度跟随温度变化较少，倾点很低。上述的某些设备如果遇到的温度变化很大或经常处于低温环境时，就需用这类液压油。这类液压油属于低温液压油。

4)粘度指数特别高的液压油，应用于要求传动特别准确的设备。如果这些设备对油的要求特别高，可以使用某些特别昂贵的合成液压油和自动传送液(Automatic Transmission Fluid)。

5)如果液压系统中含有银质或镀银零件，以用汽轮机油作液压油较好，多数液压油都含有锌，对镀银零件不利。

4.2　对液压油的要求

不同的液压传统系统对液压油的各种要求有所侧重，主要的要求是：

1)要有合适的粘度和良好的粘温性能

液压油要有多种粘度等级，以供使用者按设备的需求来选择。其粘温性能变化要小。

2)要有良好的抗磨损能力

液压系统越来越向高压高速发展，为了减少油泵柱塞、球轴承等的磨损，通常在油中结合了极压添加剂。并且通过威克斯叶片泵磨损试验、四球机试验、FZG 齿轮试验等观察其抗磨损能力达到的水平。

表 2.3.3-7

国外液压油性能

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 mm²/s 40℃	运动粘度 mm²/s 100℃	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈试验	破乳化试验达到(40/37/3)时间(min)	威克斯叶片泵试验(最大磨损,mg)	排气试验(达到不多于0.2%空气时间,min)	中和值(mgKOH/g)	苯胺点(℃)	四球机试验最大无卡咬负荷(kN)	密封适应性指数	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) ml/ml 程序Ⅰ(24℃)	程序Ⅱ(93.5℃)	程序Ⅲ(24℃)
AGIP	ARNICA 22	22	0.897	20.8	4.8	165	160	−58											
	46	46	0.871	44.0	8.2	165	180	−30											
	OSO 15	15	0.860	14.3	3.3	98	190	−30											
	32	32	0.875	30.0	5.3	110	204	−30											
	46	46	0.880	45.0	6.8	105	212	−27											
	68	68	0.885	64.3	8.6	105	218	−24											
	100	100	0.890	102.0	11.4	98	228	−24											
	150	150	0.895	143.0	14.3	98	238	−24											
BP	ENERGOL HLP																		
	15	15	0.869	15	3.32	84	165	−33	无锈		<10		0.2	87			10/无	50/无	60/无
	22	22	0.879	21.0	4.19	104	182	−30	无锈		<10		0.2	95	1.8/2.0		10/无	50/无	60/无
	32	32	0.876	31.5	5.41	106	204	−30	无锈		<10		0.2	96	1.8/2.0		5/无	50/无	5/无
	46	46	0.879	46	6.86	105	213	−30	无锈		<10		0.2	100	2.0/2.2		10/无	80/无	10/无
	68	68	0.882	69.0	8.95	105	227	−30	无锈		<10		0.2	105	2.0/2.2		10/无	80/无	10/无
	100	100	0.886	105.0	11.9	101	235	−24	无锈		<10		0.2	109	2.0/2.2		20/无	30/无	10/无
	150	150	0.888	161	15.9	101	252	−24	无锈		<10		0.2	112	2.0/2.2		20/无	30/无	10/无
	220	220	0.893	220	19.6	101	255	−24	无锈		<10		0.2	115	2.0/2.2		20/无	30/无	30/无
	ENERGOL HV																		
	15	15	0.860	15.1	3.8	143	160	−45											
	22	22	0.861	21.3	5.0	173	178	−39											
	32	32	0.876	32.2	6.0	136	200	−30											
	46	46	0.876	45.4	8.1	156	206	−30											

续上表

油公司	油名	ISO 级别	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃	运动粘度 100℃	粘度指数	闪点 (℃)	倾点 (℃)	防锈试验	破乳化试验达到(40/37/3),时间(min)	威克斯叶片泵试验(最大磨损,mg)	排气试验(达到不多于0.2%空气时间,min)	中和值 (mgKOH/g)	苯胺点 (℃)	四球机试验最大无卡咬负荷(kN)	密封适应性指数)	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) 程序I (24℃)	程序II (93.5℃)	程序III (24℃)
				mm²/s													ml/ml		
	ENERGOL HV																		
	68	68	0.877	64.4	10.1	144	208	−33											
	100	100	0.877	100.0	15	156	218	−30											
	150	150	0.892	149.4	17.5	128	225	−30											
	ENERGOL SHF -LIT 15	15	0.862	14.0	5.4	7300	90	−51					0.15						
CASTROL	HYSPIN AWH																		
	15①	15	0.870	15	3.8	150	144	−51				3				15		50/无	
	32①	32	0.875	32	6.3	150	186	−33				4				10		痕迹/无	
	46②	46	0.875	46	8.1	150	186	−33				8				9		痕迹/无	
	68②	68	0.880	68	10.9	150	192	−33				11				8		10/无	
	100②	100	0.880	100	14.5	150	192	−30				12				6		痕迹/无	
	150②	150	0.885	150	19.6	150	192	−30				20				4		痕迹/无	
	HYSPIN AWS																		
	10①	10	0.870	10	2.55	74	159	−39				1.5				14		30/痕迹	
	15①	15	0.870	15	3.20	60	156	−40				3				12		10/无	
	22①	22	0.865	22	4.25	94	171	−30				3				11		10/痕迹	
	32①	32	0.870	32	5.26	93	216	−30				4				9		10/无	
	46②	46	0.875	46	6.65	95	222	−21				7				8		痕迹/无	
	68②	68	0.875	68	8.60	96	228	−21				10				6		痕迹/无	
	100③	100	0.880	100	11.1	95	222	−21				10				4		痕迹/无	
	150④	150	0.885	150	14.5	95	222	−21				20				4		痕迹/无	

续上表

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃	运动粘度 100℃	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈试验	破乳化试验达到(40/37/3)时间(min)	威克斯叶片泵试验(最大磨损,mg)	排气试验(达到不多于0.2%空气时间,min)	中和值(mgKOH/g)	苯胺点(℃)	四球机试验最大无卡咬负荷(kN)	密封适应性指数	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) 程序I(24℃)	程序II(93.5℃)	程序III(24℃)
				mm²/s													ml/ml		
CHEVRON	AW HYDRAULIC OIL 32	32	0.87	32	5.54	110	220	−27											
	68	68	0.88	68	8.94	105	230	−24											
	MECHANISM LPS 32	32	0.88	32	6.44	162	180	−48											
	68	68	0.88	68	11.6	166	180	−39											
	100	100	0.88	100	14.3	147	190	−33											
	AVINTION HYDRAULIC FLUID	15	0.86	13.5	5.10	300	102	<−60											
	AUTOMATIC TRAN SMISS N FLUID 10		0.87	38.4	7.08	148	200	−39											
ELF	MISOLA H 22	22	0.865	22	4.3		200	−15		1.5			0.2	106					
	32	32	0.875	32	5.3		200	−15		1.5			0.2	109					
	46	46	0.880	46	6.7		225	−15		2			0.2	112					
	68	68	0.885	68	8.5		240	−15		2			0.2	115					
	VISGA 15	15	0.860	15	3.8	150	190	−45					1.3	95					
	VISGA 22	22	0.870	23	5.0	145	190	−45					1.3	97					
	32	32	0.875	34	6.6	155	200	−42					1.3	97					
	46	46	0.880	48.5	8.5	155	210	−42					1.3	101					
	68	68	0.885	73.0	11.7	155	220	−36					1.3	104					
	150	150	0.890	160.0	20.0	145	250	−27					1.3	112					
ESSO	NUTO H 5	5	0.839	4.37	1.8														
	15	15	0.853	14.20	3.3	102	186												

续上表

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度		粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈试验	破乳化试验达到(40/37/3)时间(min)	威克斯叶片泵试验(最大磨损, mg)	排气试验(达到不多于0.2%空气时间, min)	中和值(mgKOH/g)	苯胺点(℃)	四球机试验最大无卡咬负荷(kN)	密封适应性指数	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性)		
				40℃	100℃												程序I(24℃)	程序II(93.5℃)	程序III(24℃)
				mm²/s													ml/ml		
	NUTO H 32①	32	0.868	30.4	5.3	104	210												
	H 68①	68	0.875	64.6	8.5	102	210												
	H 100	100	0.880	95.0	11.0	100	238												
	UNIVIS N 15	15	0.862	14.0	3.6	151	189	−45			符合要求								
	N 32	32	0.870	30.0	6.0	151	212	−42											
	N 46①	46	0.873	44.3	8.0	152	221	−39											
	N 68①	68	0.879	66.3	10.7	152	224	−36											
	N 100①	100	0.884	97.8	14.7	156	232	−33											
FEOSO	HYDROSO OIL																		
	10	10	0.861	10	2.9	150	150	−32											
	22	22	0.872	22	4.4	109	170	−32											
	32	32	0.874	32	5.7	120	200	−30											
	46	46	0.878	46	7.0	109	205	−30											
	68	68	0.881	68	9.0	107	210	−30											
	100	100	0.883	100	11.4	101	215	−25											
	150	150	0.886	150	15.2	102	220	−15											
	220	220	0.890	220	19.3	99	230	−10											
MOBIL	MOBIL DTE																		
	21	10	0.845	10～11	2.8	95	166	−30	通过	30	100	—						最大 50/0	
	22	22	0.860	20～22	4.1	95	166	−30	通过	30	100	—						最大 50/0	
	24	32	0.871	29～32	5.0	95	201	−18	通过	30	100	5						最大 50/0	

续上表

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃	运动粘度 100℃	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈试验	破乳化试验达到(40/37/3)时间(min)	威克斯叶片泵试验(最大磨损,mg)	排气试验(达到不多于0.2%空气时间,min)	中和值(mgKOH/g)	苯胺点(℃)	四球机试验最大无卡咬负荷(kN)	密封适应性指数	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) 程序I(24℃)	程序II(93.5℃)	程序III(24℃)
				mm²/s													ml/ml		
	MOBIL DTE																		
	25	46	0.876	41~46	6.2	95	201	−18	通过	30	100	10							
	26	68	0.881	61~68	7.9	95	204	−18	通过	30	100	10							
	27	100	0.887	90~100	10.9	95	213	−15	通过	30	100	—							
	11	15	0.866	15.52	3.9	153	173	−47											
	13 M	32	0.876	32.51	6.36	151	177	−48											
	15 M	46	0.878	46-72	8.2	150	185	−48											
	16 M	68	0.884	68.5	10.55	142	193	−46											
	18 M	100	0.887	102	13.27	128	196	−37											
	19	150	0.892	153.3	17.5	125	198	−39											
	SHC 524																		
	SHC 526																		
SHELL	TELLUS OIL																		
	22	22	0.870	22	4.2	104	189	−33											
	37	37	0.872	37	6.2	115	233	−33											
	46	46	0.874	46	7.2	115	236	−30											
	68	68	0.876	68	9.3	114	242	−30											
	100	100	0.885	100	11.8	107	250	−24											
	C 5	5	0.839	4.6			57	−45											
	C 10	10	0.869	10.0	2.6	77	168	−33											
	C 32	32	0.875	32.0	5.5	110	226	−30											
	C 150	150	0.892	150.0	15.2	102	278	−9											

续上表

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃	运动粘度 100℃	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈试验	破乳化试验达到(40/37/3)时间(min)	威克斯叶片泵试验(最大磨损,mg)	排气试验(达到不多于0.2%空气时间,min)	中和值(mgKOH/g)	苯胺点(℃)	四球、试验最大无卡咬负荷(kN)	密封适应性指数	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) 程序I(24℃)	程序II(93.5℃)	程序III(24℃)
				mm²/s														ml/ml	
	TELLUS OILC 220	220	0.894	220	19.0	98	278	−9											
	T 15	15	0.871	15	3.9	160	146	−45											
	T 37	37	0.877	37	7.0	158	152	−51											
	T 46	46	0.879	46	9.0	185	168	−42											
	T 100	100	0.893	100	14.5	150	177	−33											
TEXACO	RANDO OIL HD AZ 32	32	0.869	29.7	7.1	214	191	−43											
	HD 32	32	0.870	29.7	5.2	107	210	−34											
	HD 46	46	0.874	43.3	6.6	102	213	−34											
	HD 68	68	0.879	61.6	8.0	98	227	−32											
	HD 150	150	0.891	137.0	13.3	90	238	−21											
	TEXAMATIC FLUID F		0.877	38.7	7.7	174	185	−48											
	REBTEX OIL		0.901	12.5	2.6	20	152	−51											

3)要有良好的抗氧化安定性

油氧化后会产生有腐蚀性的油溶性氧化产物和形成泥渣堵塞管路的非油溶性产物，因此需结合抗氧添加剂，并通过氧化试验。

4)要有良好的防锈性能

如果管路有锈蚀，会影响液压元件的精度和光洁度，产生磨粒磨损，促使油进一步氧化。因此，油中要结合防腐蚀添加剂，并且要通过防锈试验才说明防锈性能是否达到要求。

5)要有良好的抗乳化性和抗水解安定性

系统中若进水会使油氧化和腐蚀金属，降低润滑性能，水与油中微量的表面活性物质，还会形成乳化液，使油和水分离困难，因此油需具有良好的抗乳化能力。这需要通过抗乳化性试验。

6)要有良好的抗泡性

由于吸入管漏，管路设计不好或油位低，使空气以细小气泡的形式进入液压系统内，液压油中有空气会使系统压力下降，使系统的能量传递不稳定，加快油的氧化，因此油中需结合抗泡沫剂以消除泡沫和夹带空气还要进行抗泡沫试验和空气释放试验。

7)要有良好的抗剪切性能

油在高压高速工作条件下，经过泵、阀件、微孔等液压元件时，受到剧烈的剪切作用，会破坏油中的聚合型粘度指数改进剂，使粘度下降。检查油这方面的性能，让油在一定温度下通过专门的试验设备，经过若干个循环后，检查粘度的变化，看其下降的百分比。

8)要能与各种密封材料相适应

液压系统中有各种密封材料和涂料，液压油对它们的影响要很小，要进行一个密封相符指数的试验来确定这方面的性能。

国外国内各种液压油的性能资料列于表 2.3.3-7 至表 2.3.3-11。

表 2.3.3-8　　国产 8 号舵机液压油标准(部标准，SY 1182—80)

项目		质量指标	试验方法
运动粘度，50℃ (mm^2/s)		7～8	GB 265
运动粘度比，			
γ 20℃ / γ 50℃	不大于	3.2	GB 265
γ 0℃ / γ 50℃	不大于	9.6	
闪点(开口)(℃)	不低于	135	GB 267
凝点(℃)	不高于	−40	GB 510
灰分(%)	不大于	0.005	GB 508
水溶性酸或碱		无	GB 259
水分		无	GB 260
机械杂质		无	GB 511
酸值(mgKOH/g)	不大于	0.05	GB 264
腐蚀(T_3钢片，100℃，3 h)		合格	SY 2620
氧化安定性：			
氧化后沉淀物(%)	不大于	0.05	
氧化后酸值(mgKOH/g)	不大于	0.02	

表 2.3.3-9

国产液压油部标准
(ST 1227—82)

项　　目	质量指标					试验方法
代号(GB 2512)	YA-N 32	YA-N 46	YA-N 68	YA-N 32 G	YA-N 68 G	
牌号(GB 3141)	N 32	N 46	N 68	N 32 G	N 68 G	
相近的原牌号(按 50℃ 时运动粘度分列)	20	30	40	20	40	
运动粘度, 40℃ (mm^2/s)	28.8～35.2	41.4～50.6	61.2～74.8	28.8～35.2	61.2～74.8	GB 265
粘度指数　不小于	90					GB 2541
闪点(开口)(℃)　不低于	170					GB 267
凝点(℃)　不高于	−10					GB 510
水分(%)	无					GB 260
机械杂质(%)	无					GB 511
铜片腐蚀(T_s铜片, 100℃ × 3 h)	合格					SY 2620
水溶性酸或碱(基础油)	无					GB 259
氧化安定性(酸值达 2.0 mgKOH/g)(h)　不小于	1000					SY 2680 及注①
防锈性(蒸馏水法)	无锈					SY 2674
最大无卡咬负荷, PB(kg_1)　不小于	60					SY 2665
抗泡沫性, 93℃ (ml), 泡沫倾向　不大于	50					SY 2669 及注②
泡沫稳定性　不大于	0					
粘-滑性能(动静摩擦系数差)	—				≯0.08	见附录A及注①

注: ①为保证项目, 每批产品出厂可不作检验, 但必须合格。
②泡沫稳定性为不大于 0, 但允许量筒周围有一圈小泡。
③本产品不得加T 801 降凝剂。
④N 32 G, N 68 G 适用于液压导轨合用循环系统。

表 2.3.3-10

国产低温液压油暂定标准
(草　　案)

项　　目	质量指标				试验方法
	N 15	N 32	N 46	N 68	
运动粘度, 40℃ (mm^2/s)	13.5～16.5	28.8～35.2	41.4～50.6	61.2～74.8	GB 265
50℃ (mm^2/s)	7～13	17～23	27～33	37～43	
低温粘度到 1000 mm^2/s时的温度(℃)	−35	−20	−10	0	
粘度指数	130	130	130	130	GB 1995
闪点(开口)(℃)　不低于	160	160	160	160	GB 267
凝点(℃)　不高于	−45	−35	−25	−15	GB 510
水溶性酸或碱	中性	中性	中性	中性	GB 259
水分(%)	无	无	无	无	GB 1260
机械杂质(%)	无	无	无	无	SY 511
铜片腐蚀(100℃ × 3 h)	合格	合格	合格	合格	SY 2620

续上表

项目	质量指标				试验方法
	N 15	N 32	N 46	N 68	
防锈性	通过	通过	通过	通过	SY 2674
抗泡沫试验(93℃)泡沫倾向/泡沫稳定性(ml/ml)	50/0	50/0	50/0	50/0	SY 2669
抗乳化性(40-37-3)ml(min)	30	30	30	30	SY 2863
氧化安定性,酸值达 2.0 mgKOH/g(h) 不大于	1000	1000	1000	1000	SY 2680
四球机磨斑直径(mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	ASTM D 2266,常温,1500 r/min
油泵试验,100 h(mg) 不大于	100	100	100	100	参考ASTM D 2882

表 2.3.3-11 **国产 6 号、8 号液力传动油(企业标准)**

项目		质量标准				试验方法
		VQ/HG 9-4-76		甘Q/SY 8040-81		
		6 号	8 号	6 号	8 号	
运动粘度,100℃ (mm^2/s)	不小于	5.0~7.0	7.5~9.0	5 ~ 7	7.5~8.5	GB 265
-20℃ (mm^2/s)	不大于	—	—	—	2000	
运动粘度比,$\gamma 50℃/\gamma 100℃$	不大于	4.2	—	4.2	3.6	GB 265
闪点(开口)(℃)	不低于	180	150	165	155	GB 267
凝点(℃)	不高于	−20	−25	−30	−50	GB 510
水溶性酸或碱(醇水法)		—	中性	—	中性	GB 259
铜片腐蚀(100℃, 3 h)		合格	合格	合格	合格	SY 2620
水分(%)	不大于	无	无	痕迹	痕迹	GB 260
机械杂质(%)	不大于	无	无	0.01	0.01	GB 511
抗泡沫试验(24℃,93℃)		实测	实测	实测	实测	SY 2669
四球机试验; 无卡咬负荷(N)		实测	实测	实测	实测	SY 2665
磨斑直径, d_{20}^{30}(mm)		—	—	实测	实测	

4.3 使用中注意事项

1)液压油的品种很多,不要错用或将不同品种的液压油混合。最好贮存在清洁、保温、符合安全标准的室内。非要存放在室外时,要注意防水、防冻和防止容器损坏。容器要有明显的标志,盖子要保持密封和清洁。要定期检查循环油柜或其它油柜的油位。加油前,应把加油孔和孔盖抹干净,加油孔处如没有滤网,应使用一个有滤网的专用清洁漏斗向循环油柜加油。加油时要使用专用的清洁盛油容器。

2)控制污染,保持液压系统内的清洁。污染的来源:一方面是系统建造时留下的砂子,焊粒等;另一方面是运转中产生的金属磨损颗粒,油过热产生的炭粒,锈,漆皮,密封碎粒和乳化液等,这些系统内部产生的污染只能由过滤器清除。至于因设备缺陷或损坏引起的外界污染,则必须一发现就立即加以清除。如果经检查发现油受污染超过许可范围和机械运转不正常,说明液压系统中的阀和其它部件上积有沉淀物,要设法除去并趁热释放液压油,清洁循环油柜和滤网,更换滤器元件,同时更换新油;如果机械运转正常,只是油受污染,也应采取上述相同的措施。

3)漏油应及时排除，液压系统漏油会使油压下降，设备工作不良，并造成浪费。操作人应定期查漏。可能是管子连接处，各种仪表接头、缸头、阀帽、过滤器和泵壳等固定部件的垫床处漏油，也可能是运动元件处漏油，如活塞杆，撞杆处的填料箱，轴封等地方。这些地方都要及时检修。

4)如果有可能，应将大型液压系统中的油，定期放到沉淀柜加热沉淀和成批分油，让油保持良好状态。

5)新的液压系统必须经过彻底冲洗和清洁。冲洗前，必须制订好操作规程。冲洗时，将备用的与液压油粘度相近的冲洗油，（或加上一部分溶剂）加热至60℃，循环冲洗系统。冲洗完后，立即在冲洗温度下放走全部冲洗油。

6)液压系统在运转中要定期取油样检查油的情况。取样位置通常在放样阀或贮油器处，因为贮油器底部放出的油反映油最恶劣的情况，刮取固体污染物要用木条或塑料工具，以防止错刮了污染物下的金属。放出的油要盛在清洁的塑料或金属容器中。放出的油样除了送岸上化验室化验外，在船上可以作外观检查，即将油样静置一夜，看底部是否有水或沉淀物，也可以让油通过有5～10 μm 滤网，用10倍放大镜观察滤出物情况。

7)操作人员必须受过训练，定期检查设备的情况，做好各项设备运转、维护和修理的连续记录。

5 冷冻机油

冷冻机油主要用于船舶食物冷藏、货物冷藏和空气调节的往复式冷冻机的气缸、轴承润滑，也用于螺杆式冷冻机的转子之间，转子与气缸之间、轴封、轴承、平衡活塞的润滑。

各种冷冻机油适用于不同的制冷剂，在选用冷冻机油时不可搞错。

有各种不同粘度等级的冷冻机油，用氟里昂作制冷剂时要选用粘度较大的冷冻机油。

冷冻机油有矿物基础油和合成基础油两种。后者含蜡极少，可以用于蒸发温度更低排气温度更高的冷冻机，但需注意不可用作螺杆式冷冻机的润滑用油。

离心式冷冻机由于润滑油只用来润滑轴承和轴封，不需要接触制冷剂，因此用汽轮机油作润滑油即可。

5.1 对冷冻机油的要求

1)在冷冻机运行中制冷剂与冷冻机油互相接触，两者必须互相适应和不起化学变化。

各种制冷剂与冷冻机油之间的关系如下：

(1)氨（NH_3）与油不起反应，但油中如有水，则生成氢氧化铵使油乳化。

(2)二氧化碳（CO_2）微溶于冷冻机油，但不起化学反应。

(3)二氧化硫（SO_2）溶于水形成亚硫酸，在液态下能溶解矿物润滑油的某些成份，必须使油和制冷剂隔开，使用不受二氧化硫影响的润滑油。

(4)氟里昂：与冷冻机油互溶，能使油粘度降低。5%的氟里昂能使冷冻机油的粘度降低约一半。较高粘度的油吸附较大量的氟里昂，但温度和压力的变化也影响其吸附程度的大小，因此，用氟里昂作制冷剂时要选用粘度较大的冷冻机油。

氟利昂是一组制冷剂的总称，其中：

氟利昂-11（三氯氟甲烷）：无色液体，有芳香味，与润滑油能互溶，不溶于水，能溶解橡胶，不燃烧，不爆炸，化学安定性好，对金属不腐蚀。

表 2.3.3-12

国外冷冻机油性能

油公司	油名	ISO级别	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	粘度指数	闪点 (℃)	倾点 (℃)	浊点 (℃)	苯胺点 (℃)	中和值 (mgKOH/g)	说明
AGIP	TER 46	46	0.920	44	5.6		177	−42				
	TER 60		0.925	59	6.5		186	−38				
BP	ENERGOL LPT 46	46	0.896	45	6.0	63	167	−36	−45		0.05	适合于用F-12制冷剂的冷冻机
	ENERGOL LPT 68	68	0.902	68	7.4	57	173	−33	−42		0.05	
	ENERGOL LPT-F 32	32	0.917	29	4.3	16	160	−42	<−50		0.05	适合于用F-22制冷剂的冷冻机
	ENERGOL LPT-F 46	—	0.925	54	5.8	28	174	−39	<−45		0.05	
	ENERGOL LPS-PO 220	220	0.846	210	25.0							合成油,用于小型螺杆式冷藏压缩机和要求用高粘度润滑油的其他冷藏压缩机
	ENERGOL LPS 46	46	0.864	45.5	5.52							合成油，用于蒸发温度特别低的现代往复式和螺杆式冷藏压缩机
	ENERGOL LPS 68	68	0.866	67.3	6.75							
CASTROL	ICEMATIC 66	32	0.880	31.7	4.69		165	−36	−39			适合用于NH_3，CO_2和F_{12}制冷剂的冷冻机
	ICEMATIC 99	68	0.895	68.0	7.40		192	−30	−24			
	ICEMATIC 266		0.910	29.5	4.10		165	−48	−54			适用于氟里昂制冷剂的冷冻机，特别是F22合成油,用于蒸发温度特别低、压缩机温度特别高的冷冻机
	ICEMATIC 299		0.920	55.5	5.94		183	−36	−54			
	ICEMATIC 2284		0.860	63.6	6.50		186	−33	<−70			
CHEVRON	REFRIGERATION OIL 32	32	0.920	32	4.6	11	170	−33				适用于氨、氯化甲烷、二氧化碳和氟里昂作制冷剂的冷冻机
	REFRIGERATION OIL 68	68	0.930	68	6.7	12	200	−30				
ELF	PRIMERIA SG 100	100	0.870	100	8.0		200	−27	≤−70	81		适合用于氟里昂和普通冷冻剂如氨等作制冷剂的冷冻机，但二氧化硫除外
	PRIMERIA SG 150	150	0.875	145	11.0		200	−24	—	79		

续上表

油公司	油名	ISO	相对密度	运动粘度		粘度	闪点	倾点	浊点	苯胺点	中和值	说　明
				40℃	100℃							
		级别	(15.5℃)	mm²/s		指数	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(mgKOH/g)	
ESSO	ZERICE S 68	68	0.865	63.6	6.5		186	−33	< −60			均为合成油
	ZERICE S 100	100	0.868	98.0	8.1		196	−30	< −60			
MOBIL	GARGOYLE ARCTIC OIL LIGHT	15	0.8893	13.2	2.9	70	146	−40	−29	78.3	0.05	
	GARGOYLE ARCTIC OIL C	—	0.9042	38	5.5	55	168	−37	−23	91.1	0.1	除SO_2外，适用于各种制冷剂的冷冻压缩机，其蒸发温度可达−62℃
	GARGOYLE ARCTIC OIL C HEAVY	46	0.9071	45.2	6.2	65	182	−29	−23	93.3	0.1	
	GARGOYLE ARCTIC OIL EXTRA HEAVY	68	0.8961	64.2	7.1	65	191	−23	−23	95	0.1	
	GARGOYLE ARCTIC OIL 155	32	0.9159	32.0	4.5	17	165	−40	−51	77.2	0.01	
	GARGOYLE ARCTIC OIL 300-10		0.9060	56.8	6.2	23	190	−30	−45	77.2	0.01	
	GARGOYLE ARCTIC SHC 266	68	0.834	62.0	10.1	148	217	−53.9				合成油
SHELL	CLAVUS OIL 32	32	0.886	32.0	4.80	45	171	−42				适用于中等蒸发温度和热负荷的冷冻机
	46	46	0.889	46.0	5.80	45	196	−36				
	68	68	0.894	68.0	7.20	45	213	−33				
	S.D.REFRIGERATOR OIL		0.879	38.9			185	−43				部分合成油，适用于特低蒸发温度及以F_{22}，501及13 B 1为制冷剂的冷冻机
TEXACO	CAPELLA OIL WF 22	22	0.889	20.2	3.7	36	166	−51				
	CAPELLA OIL WF 32	32	0.894	29.8	4.6	40	202	−48				
	CAPELLA OIL WF 68	68	0.902	64.6	7.0	46	213	−37				

氟利昂-12（二氯氟甲烷）：无色液体，无毒，不燃烧，不爆炸，与冷冻机油互溶，与水溶解度小，有水存在时，能强烈腐蚀金属。

氟利昂-22（二氟氯化甲烷）：无毒，不燃烧，不爆炸，与润滑油有中等互溶性，对油的溶解度随温度增加而减少。

（5）氯乙烷、氯甲烷和二氯甲烷，都是芳香无色气体，能部分溶于水而生成盐酸，对润滑油的质量有所影响。它们都溶于润滑油，使润滑油粘度稍有下降，但仍在许可范围内。这些制冷剂常用于系统中有脱水剂的生活用冷冻机中。

2）凝点必须足够低。制冷剂将冷冻机油带入低温蒸发器的盘管中，如油的凝点不够低，便会析出蜡，影响盘管的热效率和堵塞管路。

3）与氟利昂-12混合的浊点要足够低。当氟利昂12与冷冻机油以9：1的比例混合时，组成油的各种成分互溶性变差，在温度下降时，容易形成羊毛状石蜡沉淀物。该沉淀物出现时的温度就是浊点。要求浊点尽量低，以免影响冷冻系统正常工作。为此，英国冷冻机油规格BS 2626-1975规定在－40℃时，油中的氟利昂12不溶物含量不大于0.3%，联邦德国的冷冻机油规格DIN 51503-1980规定氟利昂12不溶物含量最大为0.05%。

4）粘度和粘温性能要能保证润滑与密封。冷冻机油遇到的温度变化范围很大，其粘度也随之变化。压缩机在压缩行程时，油的粘度应足以使活塞环形成密封，但在低温下油仍然有足够的流动性和从低温部位脱除的能力。

表2.3.3-13　**国产冷冻机油标准（石油工业部）**

质量指标 \ 油品牌号 \ 技术标准		SY 1213—79				石油一厂企业标准	克炼企业标准	试验方法
		13	18	25	30	40	40	
运动粘度，50℃（mm^2/s）		11～15	18～22	25～29	30～35	40～45	不小于38	GB 265
酸值（mgKOH/g）	不大于	0.1	0.03	0.05	0.1	0.05	0.1	GB 264
灰分（%）	不大于	0.01	—	0.01	0.01	—	—	GB 508
腐蚀（T_3铜片，40号或50号铜片，100℃，3 h）		合格	合格	—	合格	合格	合格	SY 2620
水溶性酸或碱		无	无	无	无	无	无	GB 259
机械杂质		无	无	无	无	无	无	GB 511
水分		无	无	无	无	无	无	GB 260
闪点开口（℃）	不低于	160	160	170	180	190	190	GB 267
凝点（℃）	不高于	－40	－40	－40	－40	－35	－35	GB 510
浊点，与氟氯烷的混合液（℃）	不高于	—	－28	—	—	—	—	GB 2666
抗氧化安定性：								
氧化后酸值（mgKOH/g）	不大于	—	0.05	—	—	—	—	SY 2652
氧化后沉淀物（%）	不大于	—	0.005	—	—	—	—	

注：①13号适用于氨，CO_2制冷剂的冷冻机。
②18号适用于氟里昂F 12制冷剂的冷冻机。
③25号适用于氨、氟里昂—22制冷剂的高负荷冷冻机。
④30号和40号适用于排气温度145℃左右的高负荷冷冻机。

5）有足够的抗氧化安定性。冷冻机油必然与空气接触，在高温下必须不易氧化变质，特别是用于电冰箱的全封闭式冷冻机，体积小，油箱小，装油量少，不能换油，要与电冰箱同寿命，因此必须有足够的抗氧化能力。另外，还要求油对氟利昂制冷剂的稳定性，因为质量

表 2.3.3-14 **国外齿轮箱**

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈性试验	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) 程序Ⅰ(24℃) ml/ml	程序Ⅱ(93.5℃) ml/ml	程序Ⅲ(24℃) ml/ml
AGIP	BLASIA 100	100	0.890	100	11.6	95	230	−24				
	BLASIA 150	150	0.895	141	13.9	95	235	−22				
	BLASIA 220	220	0.895	220	18.7	95	240	−20				
	BLASIA 320	320	0.900	300	22.3	95	240	−18				
	BLASIA 460	460	0.905	460	30.9	95	245	−14				
	BLASIA 680	680	0.915	627	35.4	90	250	−9				
BP	ENERGOL GR-XP 100	100	0.900	96	11.1	100	193	−24	通过	—	—	—
	ENERGOL GR-XP 150	150	0.903	140	14.0	96	196	−24	通过	—	—	—
	ENERGOL GR-XP 220	220	0.906	210	18.0	94	196	−21	通过	5/0	5/0	5/0
	ENERGOL GR-XP 320	320	0.912	305	22.7	92	199	−15	通过	—	—	—
	ENERGOL GR-XP 460	460	0.919	450	27.2	88	199	−9	通过	—	—	—
	ENERGOL GR-XP 680	680	0.925	635	34.2	85	199	−9	通过	—	—	
CASTROL	ALPHA ZN 68①	68	0.875	68	8.6	96	228	−21				
	ALPHA ZN 100①	100	0.880	100	11.1	95	222	−21				
	ALPHA ZN 150①	150	0.885	150	14.5	95	222	−21				
	ALPHA ZN 220①	220	0.890	220	18.6	95	228	−9				
	ALPHA ZN 320①	320	0.895	320	23.6	95	237	−9				
	ALPHA ZN 460	460	0.900	460	30.5	95	249	−9				
	ALPHA SP 100	100	0.885	100	11.1	95	249	−21				
	ALPHA SP 150	150	0.890	150	14.5	95	249	−21				
	ALPHA SP 220	220	0.895	220	18.7	95	249	−21				
	ALPHA SP 320	320	0.900	320	24.0	95	255	−21				
	ALPHA SP 460	460	0.900	460	30.5	95	255	−6				
	ALPHA SP 680	680	0.920	680	37.3	90	264	−6				

油性能表

硫酸盐灰分%	四球机试验		梯姆肯(TIMKEN)试验OK值 (b)	IAE 齿轮试验 (400 rpm/70℃/pint/min) (b)	FZG 齿轮试验 (A/16.6/100℃) (级)
	最大无卡咬负荷 KN	磨斑直径 mm			
					12
					12
					12
					12
0.01	—	—	60～70	150	>12
0.01	—	—	60～70	150	>12
0.01	1.25	0.38	60～70	150	>12
0.01	—	—	60～70	150	>12
0.01	—	—	60～70	150	>12
0.01	—	—	60～70	150	>12
	0.95		35		12
	0.95		35		12
	0.95		40		12
	1.00		40		12
	1.00		40		12
	1.00		40		12
	1.05		60		>12
	1.00		60		>12
	1.00		60		>12
	1.30		60		>12
	1.25		60		>12
	1.40		60		>12

油公司	油名	ISO级别	相对密度(15.5℃)	运动粘度 mm²/s		粘度指数	闪点(℃)	倾点(℃)	防锈性试验	抗泡沫试验(泡沫倾向/稳定性) ml/ml		
				40℃	100℃					程序 I (24℃)	程序 II (93.5℃)	程序 III (24℃)
CHEVRON	NL GEAR COMPOUND 100	100	0.890	100	11.3		240	−24				
	NL GEAR COMPOUND 150	150	0.900	150	14.8		250	−21				
	NL GEAR COMPOUND 220	220	0.900	220	19.2		260	−21				
	NL GEAR COMPOUND 320	320	0.900	320	24.5		260	−18				
ELF	EPONA Z 68	68	0.885	68	8.6	105	230	−27				
	EPONA Z 100	100	0.895	100	11.3	100	230	−24				
	EPONA Z 150	150	0.895	150	14.6	98	230	−21				
	EPONA Z 220	220	0.910	220	18.8	98	230	−21				
	EPONA Z 320	320	0.915	320	24.0	90	230	−18				
	EPONA Z 460	460	0.920	460	30.5	90	230	−15				
ESSO	SPARTAN EP 100	100	0.885	100	11.1	96	236	−27				
	SPARTAN EP 150	150	0.890	149	14.5	95	244	−24				
	SPARTAN EP 220	220	0.895	210	18.6	94	250	−21				
FEOSO	FISGO 150	150	0.899	150	15.2	102	220	−15				
	220	220	0.902	220	19.3	99	230	−15				
	320	320	0.910	320	25.0	100	230	−10				
	FESGO 90 EP		0.901	188	17.0	96	220	−15				
	140 EP		0.918	505	32.0	94	230	−10				
MOBIL	MOBILGEAR 626	68	0.890	62	8.2	95	207	−23	通过			
	627	100	0.892	100	11.8	95	207	−23	通过			
	629	150	0.895	135	14.0	95	210	−23	通过			
	630	220	0.900	198	13.8	95	216	−18	通过			
	632	320	0.905	288	22.5	95	221	−18	通过			
	634	460	0.915	415	28.2	95	227	−7	通过			
	636	680	0.920	615	33.6	95	227	−7	通过			
SHELL	OMALA OIL 68	68	0.885	68	8.7	100	224	−27				
	100	100	0.894	100	15.2	100	258	−24				
	220	220	0.897	220	19.4	100	264	−21				
	320	320	0.902	320	25.0	100	278	−18				
TEXACO	MEROPA 68	68	0.891	66.3	8.6	101	210	−34				
	150	150	0.896	145	14.8	101	224	−30				
	220	220	0.897	209	17.5	92	232	−18				
	320	320	0.902	308	23.9	98	232	−18				

① 极压性能中等。

续上表

硫酸盐灰分%	四球机试验		梯姆肯(TIMKEN)试验OK值(b)	IAE 齿轮试验(400 rpm/70℃/pint/min)(b)	FZG 齿轮试验(A/16.6/100℃)(级)
	最大无卡咬负荷 KN	磨斑直径 mm			
					12
					12
					12
					12
					>12
					>12
					>12
					12
					12
					12
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
	250（焊接负荷）	0.32	65		13
					12
					12
					12
					12

不高的油和氟利昂混合后，在一定条件下氟利昂分子结构中的氯或氟会从甲烷的碳原子上脱离出来，此时如同时存在铜和钢，则铜会自动转移到钢表面上，称为镀铜现象。如果铜镀到节流毛细管上或节流阀座等钢部件上，会使其孔径变小，甚至堵塞通路，造成故障。氯和氟还会腐蚀设备。

提高油的抗氧化安定性和稳定性主要还是选择合适的基础油，加深基础油的精制深度或采用合成基础油，并结合抗氧化添加剂。

6)能抗泡沫。泡沫会导致润滑不良和加速氧化。如果油压突然降低，油中携带的制冷剂也会蒸发形成泡沫。冷冻机油在正常工作条件下能阻碍泡沫的形成。通常油中加入抗泡沫添加剂。

7)油中不含水分。油本身必须不含水分，而且不允许水分进入冷藏系统。因为，水分会结冰妨碍润滑剂流动，堵塞膨胀阀并与油中的制冷剂发生化学反应生成酸腐蚀金属、形成油渣和使油乳化。当发现系统中有水分时，应找出原因，排除故障。储存冷冻机油的桶，需要有严密的盖子，以保持油干燥和清洁。

国内外各种冷冻机油的性能资料见表 2.3.3-12 和表 2.3.3-13。

5.2 使用中注意事项

在制冷压缩机运转中，应经常检查油位，油温和冷却水温度以及压缩机的吸入、输出温度和压力。应定期检查油的情况，必要时予以更换。在许多船舶中，小型往复式制冷压缩机都是一年换一次油。大型制冷压缩机应定期取样化验。

冷冻机油按原来桶装贮存，用时直接加入系统内，不允许存放于油柜中，防止吸收水分。

合成冷冻机油和矿物冷冻机油不能混合使用。

6 齿轮箱油

船舶许多设备中都有减速齿轮箱，如主筒状活塞柴油机和主汽轮机都有减速齿轮箱，甲板机械和分油机都有齿轮箱或蜗轮蜗杆传动箱，这些齿轮箱用油取决于齿轮型式、功率、小齿轮的速度，环境温度和工作条件，并且还要简化品种，便于管理。主汽轮机齿轮箱和汽轮机本身采用同一压力循环系统时使用汽轮机油，主筒状活塞柴油机齿轮箱常常跟主机一起用含清净分散添加剂的柴油机油，但往往自成一个系统。机舱中许多小型减速箱往往跟主机用同一种油，蒸汽机带动的甲板机械中的齿轮箱，有时用蒸汽汽缸油，液压甲板机械中的齿轮箱有时用高粘度液压油，但多数主柴油机齿轮箱、甲板机械齿轮箱、主机转车机齿轮箱这些传递重负荷和交变负荷并在寒冷条件下工作的齿轮箱，多数用齿轮箱油。这些齿轮箱采用强压循环系统润滑或采用喷溅润滑，轴承通常均为球轴承和滚子轴承，装有密封圈。齿轮箱一般都设有加油焖头、放油焖头、油位表和有空气滤网的透气管。

6.1 对齿轮箱油的要求

1)具有合适的粘度和粘度指数

在各种工作条件下，在任何工作温度下，油的粘度都在许可范围内。这要选择经精炼的基础油来调配才能实现。

船舶重负荷齿轮箱多用ISO 150、ISO 220 粘度等级的齿轮箱油，高速正齿轮、伞齿轮和蜗轮齿轮箱，多用粘度较低的齿轮箱油。

表 2.3.3-15 国产普通工业齿轮油规格标准（SY 1172—80）

项目		质量指标									试验方法
		50	70	90	120	150	200	250	300	350	
运动粘度，50℃（mm²/s）		45～55	65～75	80～100	110～130	140～160	180～220	230～270	280～320	330～370	GB 265
粘度指数		实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	SY 2450
闪点(开口)（℃）	不低于	170	170	190	190	200	200	220	220	220	GB 267
凝点（℃）	不高于	−5	−5	−5	−5	−5	−5	−5	0	0	GB 510
残炭，加添加剂前（%）	不大于	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	GB 268
腐蚀（铜片，100℃，3 h）		合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	GB 2620
四球机法，最大无卡咬负荷Ps（N）		实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	SY 2665
机械杂质（%）	不大于	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.015	0.015	0.02	0.02	GB 511
水分（%）	不大于	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	GB 260

注：各牌号普通工业齿轮油允许加入降凝剂。

2)具有合适的极压抗磨性能

齿轮的啮合时间非常短促；同时发生滑动和滚动，而且滑动方向和力的大小急剧变化；加上加工装配误差，以及接触处的面积很小，所以齿面上的压力很大，难以保持液体动力润滑。为了减少磨损，油中必须结合油性和极压添加剂，使齿轮在传动、擦抹、重负荷和离心力的作用下仍能保持牢固的油膜，不致发生金属之间的卡咬和剥落。为了环境保护的需要，添加剂中不允许含铅。现在多数用硫磷型极压添加剂，但某些机械设备要求不含或少含极压添加剂，因此选择齿轮箱时要参看机械说明书的要求。

考查极压抗磨性能，有许多试验方法，如四球机试验，FZG齿轮试验，梯姆肯试验等，这些试验的目的相同，但方法不同，相互之间的关联性亦未发现，因此，往往几个试验都要做。

国外齿轮箱油的FZG齿轮试验，多数达到12级或12级以上。

3)具有足够的抗氧化安定性

在高温和氧气存在并受到污染的影响下，油的性能仍应保持不变，这是因为结合了抗氧化添加剂。

考察的方法是将300 ml试油，放在玻璃试管内，通入空气，流量为10 l/h，在95℃或121℃下氧化312 h，测定该油在100℃下粘度的变化百分比和沉淀物的增加情况。

4)能抗腐蚀

能保护金属不生锈和不受腐蚀，必须通过防锈和防腐蚀试验。

5)能抗乳化和抗泡沫

油泵和齿轮本身的搅拌作用都会产生泡沫，因此油必须能抗泡沫。如果有水漏入齿轮箱内，油必须能抗乳化，并与水迅速分离，故油通常要结合抗泡沫剂，并要通过这方面的试验。

国内外的齿轮箱油的性能资料见表2.3.3-14至表2.3.3-17。

表2.3.3-16 **国产硫磷型中极压工业齿轮油暂行技术标准**

项目 \ 指标 \ 牌号		N 100	N 150	N 220	N 320	N 460	N 680	试验方法
运动粘度，(mm^2/s)	40℃	90～110	135～165	198～242	288～352	414～506	612～748	GB 265
	50℃①	(54～65)	(79～94)	(112～134)	(158～190)	(220～264)	(314～378)	
粘度指数	不低于	70	70	70	70	70	70	GB 1995
闪点，开口(℃)	不低于	180	200	200	200	200	220	GB 267
凝点②(℃)	不高于	−8	−8	−8	−8	−8	−5	GB 510
水分(%)	不大于	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	GB 260
机械杂质(%)	不大于	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	GB 511
铜片腐蚀(100℃×3 h)级，	不大于	1	1	1	1	1	1	ASTM D 130
氧化安定性(95℃×312 h)								
粘度(100℃)增长(%)	不大于	10	10	10	10	10	10	ASTM D 2893
梯姆肯试验OK值(b)	不大于	45	45	45	45	45	45	SY 2685

续上表

项目 \ 指标 \ 牌号	N100	N150	N220	N320	N460	N680	试验方法
FZG齿轮试验级　　不小于	11	11	11	11	11	11	IP 344
防锈性(蒸馏水、海水)	无锈	无锈	无锈	无锈	无锈	无锈	SY 2674
抗乳化度，82℃，30 s，60 s	测定	测定	测定	测定	测定	测定	ASTM D 1401
抗泡沫试验	测定	测定	测定	测定	测定	测定	SY 2669
水溶性酸或碱	中性	中性	中性	中性	中性	中性	GB 259

① 50℃运动粘度不作为控制指标。

② 在寒冷地区根据使用需要凝点可另行协商。

表 2.3.3-17　　N 220 硫磷型高极压工业齿轮油建议指标

项　　目		质量指标	试验方法
运动粘度（mm^2/s）40℃		198～242	GB 265
100℃		报告	GB 265
粘度指数	不低于	90	GB 1995
闪点(开口)（℃）	不低于	200	GB 267
凝点（℃）	不高于	−8	GB 510
铜片腐蚀（100℃×3 h）		合格	SY 2620
防锈性（蒸馏水）		通过	SY 2674
抗乳化度，82℃，	不大于	30	SY 2683
氧化安定性（121℃×312 h）			
粘度（100℃）增长值%	不大于	6	ASTM D 2893①
梯姆基试验OK值，(b)	不低于	60	ASTM D 2782①
FZG齿轮试验，级	不小于	12	IP 344①

① 保证项目，定期抽查。

6.2 使用中注意事项

封闭齿轮箱在运转中，应每天检查油位，随时注意加油，还要检查工作温度，检查有没有漏油和噪声情况。噪声增强说明齿轮和轴承已发生故障。

大型齿轮箱要定期取样化验。停用时，若有管路接通要定期分油。小型齿轮箱则要定期从齿轮箱底部放出一些油，检查其中是否有水分和污物，并按油的情况和运转时间的长短，每年换一次或两次油。

7 开式齿轮润滑剂

7.1 开式齿轮润滑剂的主要用途

1)用作甲板机械中的起锚机、起货机、吊杆、升降机、绞缆机、舵机、救生艇艇柱、尾门、跳板升降平台等设备的开式齿轮上的润滑剂。

2)用作机舱中的某些设备如行车、天窗开关机构等的开式齿轮的润滑剂。

表 2.3.3-18 国外开式齿轮润滑剂性能表

油公司	油名	相对密度 15.5℃	运动粘度 40℃ mm²/s	运动粘度 100℃ mm²/s	梯姆肯试验OK负荷(b)	抗水性	油膜性质	最高适用温度(℃)	是否有溶剂	倾点(℃)	说明
AGIP	FIN 332/F	1.020		242					有	−9	
BP	ENERGREASE OG	0.965						−30～+150			润滑脂，针入度 2，滴点高于 400℃
BP	ENERGOL WRP	0.875							有		黑棕色，用于钢丝绳，滴点至少 90℃
CASTROL	RUSTILO 553	1.00							有		黄棕色，用于钢丝绳和开式齿轮，生成软膜，滴点 70℃
CASTROL	GRIPPA 33 S	1.000							有		黑色
	GRIPPA 60 S	1.095							有		黑色，含有MoS_2添加剂，可用喷雾器喷射
CHEVRON	PINION GREASE										
ELF	CARDREXA DC 1								无		
ESSO	SURETT FLUID 4 K			100							
MOBIL	MOBILTAC A	1.081	583	482	通过	中等	胶粘	66	有		
	C	1.116	583	1940	通过	中等	胶粘—硬	93	有		
	D	1.092	1510	1940	通过	优良	胶粘—硬	93	有		
	E	1.069	8630	1953	通过	优良	胶粘—硬	93	有		
	F	1.037	43150	3685	通过	优良	硬—干	204	有		
SHELL	CARDIUM COMPOUND D	0.995		203					无		
	CARDIUM FLUID F	1.080							有		
TEXACO	CRATER 1 X	0.981		210					无	29	
	CRATER 2 X FLUID	1.063							有	−20	

3)用作某些开式齿轮润滑剂和钢丝绳用油。

7.2 对开式齿轮润滑剂的要求

1)具有足够的吸附性或粘性。能够牢固地粘附在齿轮上，不会因齿面啮合而被刮去，也不会被风吹走或被齿轮工作时的离心力抛掉，不会吸附水分或被海水、雨水、雪水冲走。天冷时，油不能太粘稠，以致失去粘性而难以应用；天热时，又不至于变薄而从齿面上掉下来污染环境。

2)具有足够的承载能力。齿面上要始终保持润滑剂薄膜，以防止金属和金属直接接触面引起齿面磨损。

3)易于使用。

总之，为了达到上述三个要求，调配润滑剂时，选用矿物油、沥青加上粘附剂、防锈剂；为了提高某承载能力，还要加上二硫化钼极压抗磨剂；为便于使用，一些产品用溶剂稀释。

国外国内各种开式齿轮润滑剂见表 2.3.3-18 和表 2.3.3-19。

表 2.3.3-19 **国产开式齿轮油企业标准**（Q/SY 8050—79 S）

项　　目		质量指标				试验方法
		1#	2#	3#	4#	
运动粘度，100℃（mm^2/s）		50～70	80～120	130～220	250～330	企业方法
闪点(开口)（℃）	不低于	200	200	210	210	GB 267
铜片腐蚀（100℃×3 h）		合格	合格	合格	合格	SY 2620
锈蚀试验（蒸馏水）		实测	实测	实测	实测	SY 2674
四球机无卡咬负荷（N）		实测	实测	—	—	SY 2665

7.3 使用中注意事项

开式齿轮润滑剂一般有两种：一种是没有加溶剂的产品，是极粘稠的黑油，需加热变稀薄后用刷子涂在齿轮和钢丝绳上；另一种产品被不易着火的易挥发的溶剂稀释后，涂在齿轮和钢丝绳上，溶剂挥发了，留下黑油保护层，使用时可用喷雾、刷子涂、强压供液等方法。用于钢丝绳时，应注意使润滑剂渗透到芯子里面去。为此，有时把整捆钢丝绳浸入盛有开式齿轮润滑剂的大铁槽里，放一段时间才拿出来。

由于这种润滑剂含有易挥发的溶剂，盛放的油桶一定要保持密封。以防止溶剂挥发。桶内的润滑剂如挥发了少量溶剂，以后就很难从桶中倒出来。倒出来的润滑剂要立即使用。

8 乳化防锈油

乳化防锈油是机床中金属切削时的冷却液和防锈液。该油在船上用于柴油机冷却水系统，特别是活塞冷却水系统中。

在冷却水系统中，会发生电化学腐蚀、空泡腐蚀和积结水垢，因而妨碍传热，腐蚀机件，严重时甚至会使机件烂穿。目前大多采用的防止方法是：在发动机开始工作前清洗整个系统，然后加入乳化防锈油。这种油含有乳化、极化和钝化添加剂，能在水里形成乳化液，吸附在金属表面而将金属与水隔开，从而保护金属不受腐蚀，同时增加金属表面张力，起防止震裂作用。

各发动机制造厂对冷却水系统使用乳化防锈油有不同的看法。因此，这种油只适用于

MAN和SULZER 柴油机用水作活塞冷却剂的活塞水冷却系统。

8.1 对乳化防锈油的要求

1)能在水里迅速形成乳化液;

2)能保护冷却水系统不受腐蚀，也不结水垢;

3)能润滑和密封活塞冷却套管和摆臂机构;

4)具有热稳定性，在高温下不致于析出油来;

5)乳化液漏入曲柄箱后，不会腐蚀曲柄箱中的机件。

一些乳化防锈油的简要性能见表 2.3.3-20。

表 2.3.3-20 **乳化防锈油性能**

油公司	油　名	相对密度 15.5℃	运动粘度 40℃ (mm^2/s)	倾点 (℃)
AGIP	ULEX M-ULEX 100	0.954	65.0	−39
BP	DIATSOL M	0.896	30.4	−12
ELF	SARELF A	0.940		−39
SHELL	DROMUS OIL B	0.934		

8.2 使用方法

1)对水质的要求:

活塞冷却水的硬度必须合适，水质太硬，乳化液不稳定时，可加入蒸馏水或放入碳酸钠使之软化; 水质太软，会出现泡沫，可放入适量的硫酸钙和硫酸镁使之硬化。理想的硬度范围是 80～290 ppm $CaCO_3$。如果硬度超过 290～570 ppm $CaCO_3$，对水需进行软化。

2)每星期至少要化验一次防锈油的浓度，其浓度不够，则防止腐蚀能力不足; 若浓度太大，乳化液便析出油，附在传热面上，严重影响传热。

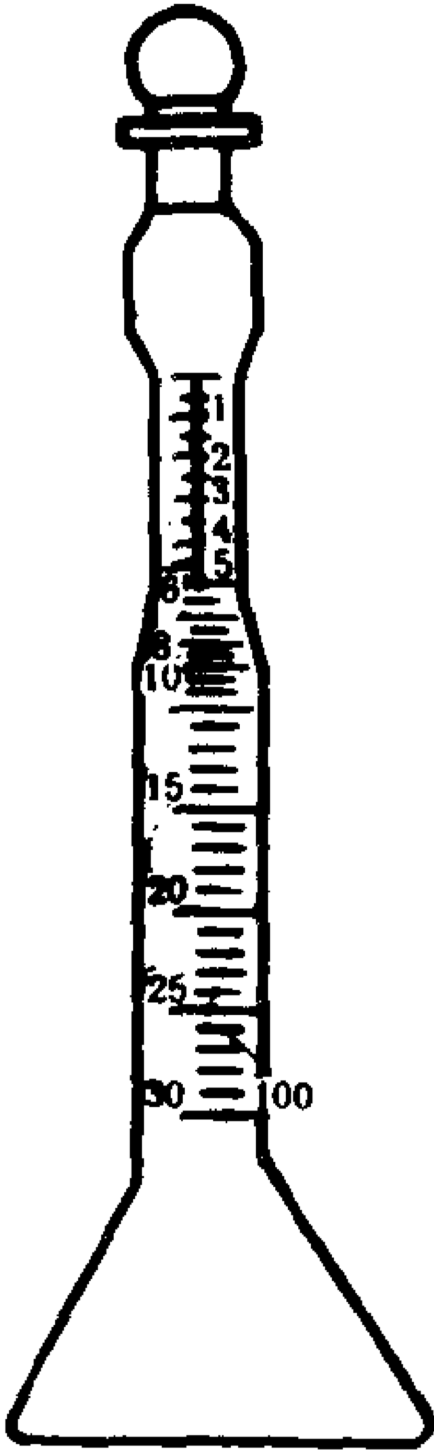


图 2.3.3-1 乳化液浓度测量瓶

防锈油的浓度应是 0.5%～1%容积。要根据化验结果及时补充乳化防锈油。

3)乳化防锈油浓度的两种检查方法:

(1)用测量瓶测量（图 2.3.3-1)

把有代表性的冷却至定温的乳化液，放入测量瓶至下刻线处(约 100 ml)，再倒入浓盐酸至上刻线处(约 30 ml)，盖上测量瓶摇匀，打开塞子把测量瓶放在开水或尽可能热的水里，乳化液受热膨胀，逐渐析出油珠，最后在液面成为油层，乳化液本身变为透明液体。反应完成后，把测量瓶从热水中取出，待乳化液冷却至室温收缩复原后，油、水层分界面在测量瓶上所示刻度，就是乳化防锈油在冷却水中的浓度，反应时间通常需要数小时。

(2)用折光仪测量（图 2.3.3-2)

打开仪器的光线入射板，将经过过滤冷却至室温有代表性的乳化液样品用吸管滴入一滴在棱镜上，盖上入射板，对着目镜观察，调节目镜，两个不同亮度区域的界线所示的数值就是乳化液浓度，然后用仪器箱提供的物品清洁入射板和棱镜，将仪器放回

仪器箱内的皮套里，仪器箱放在清洁干燥的地方，仪器不要放在手里过长时间。

定期检查仪器的零点，将一滴纯水滴在棱镜上，检查界线是否在0的位置。如果不在零位，用螺丝刀转动仪器的调节螺钉直到界线抵达的位置。

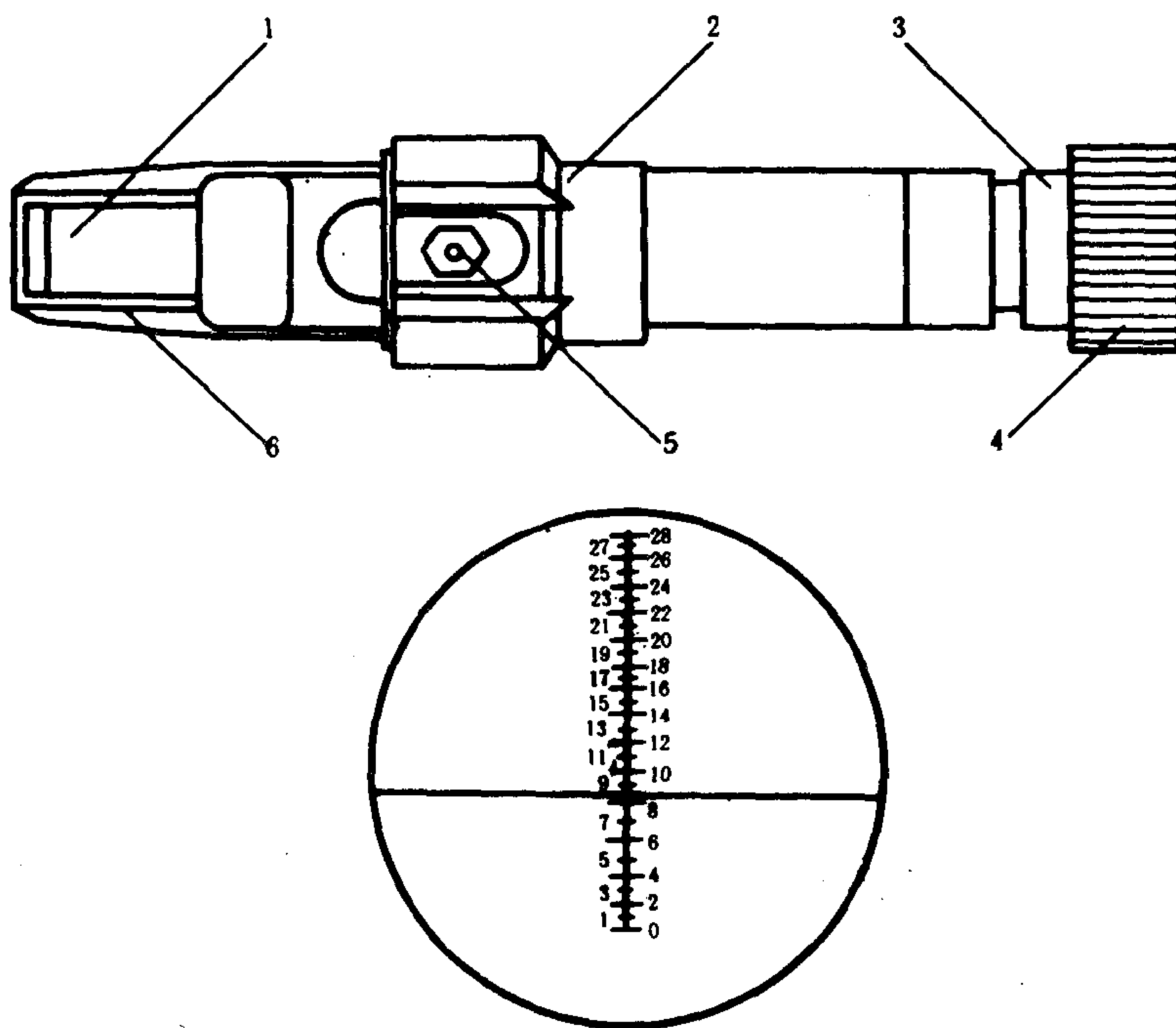


图 2.3.3-2 折光仪

1-棱镜；2-透镜系统；3-目镜调节器；4-目镜；5-零点调节螺丝；6-光线入射板

9 压缩机油

船上空气压缩机主要用来产生主、辅柴油机起动所需的压缩空气，部分小空气压缩机主要产生仪表及控制所需的压缩空气，多数压缩机是往复式空气压缩机。另外，还有在紧急状态使用的由柴油机带动的应急空气压缩机，当主、辅柴油机因没有压缩空气不能起动时，由它产生辅柴油机起动所需的压缩空气。

为了简化品种，多数空气压缩机使用和辅柴油机用的SAE 30粘度等级的柴油机来润滑气缸和轴承，但如工作条件特别艰巨的空气压缩机，则要用压缩机油作为润滑油，甚至用合成的压缩机油作为润滑油。回转式压缩机（包括螺杆式压缩机、滑片式压缩机）也应当用压缩机油作润滑油。离心式压缩机应当以汽轮机油作为润滑油，而应急空气压缩机应以含粘度指数改进剂（稠化剂）的柴油机油作为润滑油。

9.1 对压缩机油的要求

1)有良好的抗氧化性能

由于压缩后的空气温度很高，在某些状态下可高达220℃，且有高氧分压（气体总压力与该气体中氧气的百分比的乘积）存在，并有冷凝水和铜管起催化作用，油比在大气中更易氧化。因此油必须有良好的抗氧化性能，在高温下能保持合适的粘度，以便润滑气缸。

2)尽可能少生成碳沉淀物

油长期以薄油膜附在压缩机的高温金属阀片上，容易形成碳沉淀物，这会使压缩机漏气。因此，要求油在高温下尽可能不生成或少生成碳沉淀物。

3)良好的抗乳化性

当压缩空气被冷却后，大量水便凝结出来，通常在一、二级和多级压缩机的后几级，特别是最后一级气缸内常有水分。还有，压缩机停止运转或间断运转时，气缸及曲柄箱内易凝结水分。这些水分会冲走气缸表面上的油膜，使缸套生锈，因此要求压缩机油能很容易与水

分离，而不致产生乳化。

要达到这些要求，主要是基础油要选好和经过高度精炼，并结合抗氧、抗磨损、防锈添加剂，提高抗氧化安定性、抗磨损性、防锈性能和减少碳沉积物。合成压缩机油能较好地符合这些要求。

国内外的压缩机油性能见表 2.3.3-21 至表 2.3.3-23。

表 2.3.3-21 国外压缩机油性能表

油公司	油名	ISO 级别	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 mm²/s 40℃	100℃	粘度指数	闪点 (℃)	倾点 (℃)	说明
AGIP	DICREA 100	100	0.890	100	11.4	100	235	-10	
BP	ENERGOL RC-S 32	32	0.829	28.7	5.5				合成油
	ENERGOL RC-S 68	68	0.844	68.4	10.5				合成油
	ENERGOL RC-S 100	100	0.848	103.1	143				合成油
CASTROL	AIRCOL PD 68	68	0.875	68	8.6	96	222	-15	
	AIRCOL PD 100	100	0.875	100	11.4	100	243	-12	
CHEVRON	HD COMPRESSOR OIL	100	0.870	98	8.3	38	210	-27	合成油
ESSO	EXXON COMPRESSOR OIL 77		0.877	77.9	9.8	105	256	-24	
MOBIL	RARUS 424		0.864	29	5.2	95	218	-9	
	RARUS 425		0.870	52	7.4	95	222	-9	
	RARUS 427		0.872	81	9.9	95	240	-9	
	RARUS 827								合成油
	RARUS 924								合成油
SHELL	CORENA OIL H 68	68	0.875	68	9.0	106	210	-12	
	CORENA OIL H 100	100	0.879	100	12.0	100	205	-9	

表 2.3.3-22 国产压缩机油标准 (SY 1216—77)

项目		13 号	19 号	试验方法
运动粘度，100℃ (mm²/s)		11~14	17~21	GB 265
酸值（未加添加剂时）(mgKOH/g)	不大于	0.15	0.10	GB 264
氧化安定性：氧化后沉淀(%)	不大于	0.3	0.02	SY 2652
灰分 (%) 未加添加剂时，	不大于	0.015	0.01	GB 508
加添加剂后	不大于	—	0.08	
水溶性酸或碱		无	无	GB 259
机械杂质 (%)	不大于	0.007	0.007	GB 511
水分 (%)		无	无	GB 260
闪点(开口) (℃)	不低于	215	240	GB 267
腐蚀度 (g/m²)	不大于	60	10	GB 391

表 2.3.3-23 国产压缩机油选用表

工作条件 \ 油牌号	13 号	19 号
最高排气温度 (℃)	<160	<200
最高工作压力 (N/cm²)	<400	400~2000

9.2 使用中注意事项

当压缩机在运行时，应注意：

1)检查曲柄箱的油位是否在规定范围。

2)定期吹放中间冷却器、空气瓶的水分。

3)检查压缩机油、排气和冷却水温度是否在许可范围内。

4)检查机械注油器的供油是否正常。

5)定期检查曲柄箱存在的水和污染物情况。

6)定期清洁进、排气阀片和排气管中的零件。

7)定期放走曲柄箱中的润滑油，清洁曲柄箱，充入新油。

8)定期清洁进气过滤器和曲柄箱呼吸阀过滤器。

9)如属强力润滑系统，则要定期清洁过滤器和更换滤器元件。

10 液化石油气压缩机油

液化石油气压缩机油用于运输液化石油气船舶的石油气压缩机（往复式或回转式）作润滑油。这里的石油气包括丁烷、丙烷、乙烯和丙烯在内。

石油气在压缩机内压缩后液化，溶解于压缩机油中，使其粘度大大下降。压缩过程石油气有聚合现象。温度和压力越高，越易聚合。石油气中的丁二烯、环戊二烯、异戊二烯等聚合物呈胶粘状态，易附着在气缸壁、活塞环、阀片等处，影响压缩机正常运转。为此，要求石油气压缩机油对石油气的溶解度要小，以保持较合适的粘度。现在，这些以合成油为基础油的石油气压缩机油都有很高的粘度指数，对石油气的溶解度较小，因此在使用过程能保持合适的粘度。另外，该油结合了抗氧和防锈添加剂，故在这方面性能优良。

这种油的价格是所有油中最昂贵的，一定要注意节约使用。

各种国外液化石油气压缩机油的性能见表 2.3.3-24。

表 2.3.3-24　　国外液化石油气压缩机油性能

油公司	油　名	相对密度 (15.5℃)	运动粘度 mm²/s		粘度指数	闪点 (℃)	倾点 (℃)	残炭 (重量%)	中和值 (mgKOH/g)	防锈试验	说明
			40℃	100℃							
AGIP	DICREA S 150	1.054	143		144		−34	0.27	0.07		
BP	LPG ENERGOL GCS 150	1.06	143.9	26.8	>200	227	−39	0.02	1.05	通过	
BP	ENERGOL GCS 180	1.057	185.0	35.0							
CHEVRON	LPG COMPRESSOR LUBRICANT	1.09	126	18.5	162	270	−24				
ELF	PRIMERIA LPG 150	1.06	142	26.5	210	280	−48		0.2		
ESSO	EXX-MAR LG	1.06	185	30.0	>200	260	−30				
MOBIL	GAS COMPRESSOR OIL										

第 4 章　润滑脂和金属保护剂

1　润滑脂

润滑脂是由液体润滑剂、稠化剂和添加剂组成的具有可塑性的润滑剂。

液体润滑剂占润滑脂总量约 90%，它的粘温性能大致决定了润滑脂的高、低温使用范围。某些要求高的润滑剂用合成的液体润滑剂作基础油。

稠化剂约占润滑脂总量的 10%～20%，分为：

1）皂基稠化剂：由硬脂酸，12 羟基硬脂酸或动植物脂肪与碱土金属的氢氧化物反应得到相应的脂肪酸的金属皂，与单一金属皂作为稠化剂制成的润滑脂，就用这种金属皂来命名，如锂基脂、钙基脂、钠基脂、铝基脂等。

2）由两种或两种以上的单一金属皂同时作为混合稠化剂来制成润滑脂。

3）在金属皂的基础上加上复合剂而形成两种不同的脂肪酸结合在同一金属原子上形成的复合皂稠化剂。

4）非皂性稠化剂，如石蜡和地蜡，有机膨润土、硅胶等。

添加剂约占润滑脂总量的 5%，常用的有抗氧剂、防锈剂、极压抗磨剂等。

船上许多轴承特别是电动机的轴承都用润滑脂润滑，电动机的轴承大多数是球轴承和滚子轴承。许多电动机均使用密封好的预先充满润滑脂的轴承，其润滑脂一直可用到轴承报废。但许多轴承需要定期加入润滑脂，轴承壳上通常有供加入润滑脂的油杯和放出润滑脂的塞子。

对船用润滑脂的要求：

1）具有并能较长期保持合适的针入度，能正常供应轴承，保持密封而不致漏出产生污染。润滑脂的稠度大小以针入度表示。针入度值越大，表示润滑脂的结构力越弱，即稠度越小；反之则稠度越大。

润滑脂在机械力长期作用下，稠度将下降。这是因稠化剂的纤维结构，承受长时间剪切破坏时，纤维变短，稠度下降；但在遭受轻度剪切时，纤维还可再度叠合而恢复稠度，这种抗机械剪切作用性能，称为润滑脂的机械安定性，这个性能可用剪断试验机来测定，以工作前后针入度的差值来表示。

2）在贮藏和使用中有良好的胶体安定性。润滑脂是一个胶体体系，在凝胶纤维之间依靠毛细管作用吸附着一定量的基础油。当受到外力或温度升高时，胶体结构改变，会析出基础油。胶体体系稳定程度称为胶体安定性，以分油量来表示。

润滑脂在长期贮存时，表面上会有少量油析出。在使用中过量析油是不好的，但析出少量的基础油有利于轴承的润滑。

3）具有良好的抗氧化安定性，能长期使用而保持原有性能不变。同时具有防锈性能。润滑脂在工作中，基础油和稠化剂都会产生氧化变质，作为稠化剂使用的脂肪酸金属皂还有促进氧化的作用。为此，在润滑脂中加入必要的抗氧剂，以提高其使用寿命和延长贮存期。润滑脂中结合防锈添加剂，以提高遇水时的防锈能力。

4）当工作场所遇到水时，仍能保持良好的润滑效果，抗水性好。这方面与稠化剂种类、基础油种类和粘度有关。钠皂易溶于水，形成水包油型的乳化体而破坏了润滑脂的结构。钠基润滑脂的抗水性差，铝、钙、锂、钡基润滑脂可以吸收适当的水，形成油含水型的乳化体，

具有良好的抗水性。

5)有良好的耐热性。皂基润滑脂中的脂肪酸皂，有固态、液晶态和液态的三个相状态存在。受热负荷后，三个相状态发生变化，称为相变化。相变化产生了，润滑脂亦跟着变化，不同的金属皂具有不同的相转变点。锂皂相转变点较高，锂基脂的滴点较高。钙基脂中加有一定量的水作为润滑脂的结构稳定剂，温度升高时，水会蒸发，基础油和皂基分离而破坏了钙基脂的结构，所以钙基脂不能用于70℃以上的场合。非皂基润滑脂的耐热性较好。

6)有良好的极压抗磨性。船上许多使用润滑脂的地方是高负荷的低速设备，长期处于边界润滑状态，因此使用的润滑脂中要结合油性和极压添加剂，以减少轴承的磨损。

在结合了最有效的极压剂也承受不了负荷的地方，通常结合固体润滑剂——石墨和二硫化钼来防止过度的摩擦和磨损，这些固体润滑剂都是惰性的，与金属有很好的亲和力，多数是层状结构，具有裂开的平面，很象一叠卡片。当它们覆盖的工作表面受到高负荷时，它的各层平面互相滑动从而保护了工作表面。石墨在存在湿度较高的空气中时，是很好的固体润滑剂。二硫化钼在许多恶劣条件下是一种更好的润滑剂，它在没有水时，能满意地工作，在370℃高温下，也能持续工作，因此它最适合与锂基脂或高温脂结合作抗卡咬的润滑脂。

在各种润滑脂中，比较能符合上面要求的是锂基脂。目前针入度2或3的锂基脂成为国际船舶的多用途润滑脂，也就是主要润滑脂。各种电动机轴承、甲板机械，如起锚机、起货机、绞缆机、吊杆升降机、救生艇柱等的许多轴承都用锂基脂润滑。结合了抗氧、防锈、极压添加剂的极压锂基脂，性能进一步改进，特别是承载能力有了提高，可用于重负荷和交变负荷的场合。针入度0和1的极压锂基脂有很好的可泵性，可作为远距离集中加脂润滑用脂。二硫化钼极压锂基脂则用在更高温更恶劣的场合。

钙基脂具有良好的抗水性，主要用于潮湿环境或与水接触的各种机械的润滑，如：旧式的尾轴管用脂、舵柱用脂以及水泵压盖用脂。当钙基脂结合了石墨固体润滑剂后，润滑性能和承载能力进一步得到改进。注意别将这种脂用于高温场合。

钠基脂具有较长的纤维结构和良好的抗热性，可以使用在震动较大、温度较高的滚动或滑动轴承上，可在80℃或80℃以上的温度较长时间内工作。

高温脂具有经表面改性的有机膨润土的非皂机稠化剂，没有滴点，结合抗氧剂后可以用于200℃需要用脂润滑的场合。当结合了二硫化钼固体润滑剂后，使其抗卡咬性能显著提高。锅炉和汽轮机的滑动底脚，汽轮机壳的螺栓螺纹，高温蒸汽阀杆的螺纹润滑剂等场合，涂上这种润滑脂后，拆卸螺母省力。

硅酮基润滑脂适合作为与石油产品接触的场合的润滑脂。

国外国内有关船用润滑脂的性能见表2.3.4-1至表2.3.4-6。

表2.3.4-1　**国外船用润滑脂性能资料表**

油公司	润滑脂名	润滑脂等级	工作针入度 25℃	平均滴点(℃)	皂基	说明
AGIP	GR MU 2	2	280	190	锂	锂基脂
	GR MU 3	3	230	195	锂	锂基脂
	GR SM	2	280	190	锂	二硫化钼锂基脂
	GR MU EP/0	0	370	180	锂	极压锂基脂
	GR MU EP/1	1	325	185	锂	极压锂基脂
	GR MU EP/2	2	280	185	锂	极压锂基脂
BP	ENERGREASE MM EP 0	0	355/385	163	锂	极压锂基脂，工作温度120℃

续上表

油公司	润滑脂名	润滑脂等级	工作针入度 25℃	平均滴点（℃）	皂基	说明
BP	ENEREASE MM-EP 1	1	310/340	173	锂	极压锂基脂工作温度 120℃
	ENEREASE MM-EP 2	2	265/295	175	锂	极压锂基脂工作温度 120℃
	ENERGREASE L21-M	2	265/295	190	锂	二硫化钼锂基脂
	ENERGREASE PETROL RESISTANT		180/220	230	硅	用于接触石油产品的泵压盖
	ENERGREASE HB 2	2	275	无		高温脂，工作温度 200℃
CASTROL	SPHEEROL AP2	2	280	175	锂	锂基脂工作温度－30/105℃
	SPHEEROL AP3	3	235	175	锂	锂基脂工作温度－25/105℃
	SPHEEROL LMM	2	280	180	锂	锂基脂工作温度－18/95℃
	SPHEEROL EPL0	0	370	170	锂	极压锂基脂工作温度－18/105℃
	SPHEEROL EPL1	1	330	170	锂	极压锂基脂工作温度－18/105℃
	SPHEEROL EPL2	2	270	170	锂	极压锂基脂工作温度－18/105℃
	IMPERVIA GS	2	280	95	钙	钙基脂工作温度－18/60℃
	SPHEEROL LG	2/3	260	100	钙	0.5%石墨钙基脂工作温度－12/60℃
	SPHEEROL UW	5	145	100	钙	船用5%石墨钙基脂工作温度－12/60℃
	SPHEEROL BN	3	245			高温脂工作温度－7/260℃
	SPHEEROL BM3	3	245			二硫化钼高温脂工作温度－7/260℃
	SPHEEROL BN1	1	325			高温脂工作温度－7/260℃
	SPHEEROL BNS	2	265			高温脂工作温度－25/180℃
CHEVRON	DURA-LITH EP GREASE 0	0			锂	多用途极压锂基脂
	DURA-LITH EP GREASE 2	2			锂	多用途极压锂基脂
ELF	EPEXA 2	2	265/295	>180	锂	锂基脂
	EPEXA MO2	2	265/295	>180	锂	二硫化钼锂基脂
ESSO	BEACON EP2	2	272	190	锂	极压锂基脂工作温度－30/125℃
	NORVA 275					高温脂，可高达 200℃
	CAZAR K 2					抗水脂，用于潮湿环境
MOBIL	MOBILUX EP 023	000			锂	极压锂基脂，用于低温
	MOBILUX EP 0	0	350/390	170	锂	极压锂基脂，用于低温
	MOBILOX EP 1	1	305/345	170	锂	极压锂基脂，工作温度－25/120℃
	MOBILUX EP 2	2	260/300	177	锂	极压锂基脂，工作温度－20/130℃
SHELL	ALVANIA GREASE R2	2	265/295	180	锂	锂基脂，工作温度－35/100℃
	ALVANIA GREASE R3	3	220/250	180	锂	锂基脂，工作温度－35/135℃
	ALVANIA EP GREASE 1	1	310/340	180	锂	极压锂基脂
	ALVAINIA EP GREASE 2	2	265/295	180	锂	极压锂基脂
	BARBATIA GREASE 4	4	175/205	100	钙	石墨钙基脂
	RETINAX AM	2	265/295	180	锂	二硫化钼锂基脂

续上表

油公司	润滑脂名	润滑脂等级	工作针入度 25℃	平均滴点(℃)	皂基	说明
TEXACO	MARFAK HEAVY DUTY 2	2	285	217	钠	钠基脂
	MARFAK HEAVY DUTY 3	3	230	224	钠	钠基脂
	MARFAK MULTI PURPOSE 2	2	273	199	锂	锂基脂
	PREMIUM RB GREASE		280	202	锂	锂基脂
	MULTIFAK EP 2	2	281	199	锂	极压锂基脂
	TEXCLAD 2	2	270	106	钙	二硫化钼钙基脂

表 2.3.4-2　国产锂基润滑脂（1,2,3,4 号）标准（SY1412—75）

项目	质量指标				试验方法
	ZL-1	ZL-2	ZL-3	ZL-4	
外观	从淡黄色到暗褐色的均匀油膏				目测
滴点（℃）不低于	170	175	180	185	GB270—76
针入度（25℃，150 g）					GB269—77
60 次　1/10 mm	310～340	265～295	220～250	175～205	
1 万次　1/10 mm 不大于	375	355	315	285	
腐蚀（钢片，铜片，100℃，3 h）	合格	合格	合格	合格	SY2710—66
游离碱　NaOH% 不大于	0.1	0.1	0.15	0.15	SY2707—78
游离有机酸	无	无	无	无	SY2707—65
水分（%）不大于	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	GB512—65
机械杂质	无	无	无	无	GB392—77
分油量（压力法）（%）不大于	—	20	12	8	GB392—77
氧化安定性（800kPa，100℃，100 h）					SY2715—77
压力降（kPa）不大于	50	50	50	50	
氧化后酸值（mgKOH/g）	无	无	无	无	

表 2.3.4-3　国产钙基润滑脂（1,2,3,4,5 号）标准（GB491—65）

项目	质量指标					试验方法
	ZG-1	ZG-2	ZG-3	ZG-4	ZG-5	
外观	从淡黄色到暗褐色，在玻璃上涂抹 1-2 mm厚的润滑脂层，对光检查时，至均匀无块状的油膏					目测
滴点（℃）不低于	75	80	85	90	95	GB270—76
针入度（25℃，150 g）1/10 mm	310～340	265～295	220～250	175～205	130～160	GB269—77
腐蚀（钢片、黄铜片，100℃，3 h）	合格	合格	合格	合格	合格	SY2710—66
游离碱 NaOH% 不大于	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	SY2707—78
游离有机酸	无	无	无	无	无	SY2707—78
机械杂质（酸分解法）	无	无	无	无	无	GB513—77
机械杂质，抽出法（%）不大于	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	SY2709—62
水分（%）不大于	1.5	2.0	2.5	·3.0	3.5	GB512—65
分油量，压力法（%）不大于	20	16	12	9	6	GB392—77

表 2.3.4-4　国产石墨钙基润滑脂标准（SY1405—65）

项目	质量指标	试验方法
外观	黑色均匀油膏	目测
滴点（℃）不低于	80	GB270—76
腐蚀（钢片，100℃，3 h）	合格	SY2710—66
安定性	合格	密闭容器保存一个月无油析出。
水分（%）不大于	2	GB512—65

表 2.3.4-5　　国产船用润滑脂（1，3 号）标准（Q/SY12003—64）①

项　　目	质量指标		试验方法
	1号	2号	
外观	褐色均匀无块状的油膏		目　测
滴点（℃）不低于	85	95	GB270—76
针入度（25℃，150 g）1/10 mm	300～350	200～250	GB269—77
水分（%）不大于	痕　迹	痕　迹	GB512—65
机械杂质（酸分解法）	无	无	GB513—77
防护性能（钢片，黄钢片，50℃，24 h）	合　格	合　格	SY2712—59

① 该产品为铝皂脂。

表 2.3.4-6　　钠基润滑脂（2、3、4 号）（GB492—77）
4 号高温润滑脂标准（SY1511—65）

项　　目	质量指标				试验方法
	ZN-2	ZN-3	ZN-4	ZN6-4	
外观	深黄色到暗褐色均匀油膏			黑绿色均匀油性软膏	目　测
滴点（℃）不低于	140	140	150	200	GB270—76
针入度（25℃，150 g）1/10 mm	265～295	220～250	175～205	170～225	GB269—77
水分（%）不大于	0.4	0.4	0.4	0.3	GB512—65
游离碱 NaOH% 不大于	0.2	0.2	0.2	0.15	SY2707—78
游离有机酸	无	无	无		SY2707—78
灰分（%）不大于	4.0	4.5	5.5	7.0	SY2703—66
机械杂质（酸分解法）	无	无	无	无	GB513—77
腐蚀	合格	合格	合格	合格	SY2710—66
安定性	合格	合格	合格		
分油量（漏斗法，50℃，24 h）（%）不大于				6	SY2716—77s

使用润滑脂中需注意：

向轴承加入润滑脂的次数与许多因素有关，如所用润滑脂的质量、工作温度、工作环境是否清洁、是否有水分存在以及是否连续使用等。由于各种因素相差悬殊，有些轴承一年只需加入一次即可，有些每天都要加添。但不论属于那种情况，重要的是应使用合适的润滑脂和加入合适的数量。润滑脂不足，会导致轴承损坏；而润滑脂过满，则会妨碍滚动零件的运动，使轴承过热，润滑脂软化和加速氧化。沿轴漏出的润滑脂还会影响电动机中线圈的绝缘性能。发现这种情况时，可打开塞子放出一些润滑脂。

使用润滑脂枪加入润滑脂应当在电动机正常工作和温度正常时进行，其方法如下：

1）取下供放出润滑脂用的塞子，清洁塞子开口中的沉积物；

2）清洁供加入润滑脂用的附件和滑脂枪的喷嘴，防止污物进入轴承；

3）用滑脂枪加入润滑脂，直到供放出润滑脂用的塞子被打开，出现新润滑脂时才停止。

4）使电动机继续转，当过量的润滑脂被挤出后，拧回塞子。

某些小型电动机的球轴承没有供加入润滑脂用的附件，而是定期拆出进行清洁并由人工加入润滑脂。这里需要注意，只能加到所能容纳润滑脂量的 1/2～1/3。

盛装润滑脂的桶必须保持清洁，用后必须盖严。

2 金属防锈剂

金属受外界环境或介质的化学作用或电化学作用而引起的变质或破坏称为腐蚀。金属及其制品受腐蚀带来的直接间接损失十分巨大。所以，通常用“暂时性保护”方法来防锈，主要是用防锈油脂。它们的品种非常多，有溶剂稀释型防锈油，石油脂型防锈油、防锈润滑油、防锈润滑脂、指纹除去型防锈油；生成的保护膜有硬膜型、软膜型，厚度也不同，结合的添加剂也不同，表 2.3.4-7 列出了国外的一些金属防锈剂。

表 2.3.4-7 国外的金属防锈剂

油公司	溶剂名称	说明
AGIP	GR PV2	防锈石油脂，针入度等级为 2 级，针入度 280℃，滴点 135℃
BP	ENERGOL CPD B3	这种产品可形成薄膜、中膜和硬膜，室内防护有效期 18 个月，室外为 6~9 个月，有良好抗水功能，清除薄膜要用溶剂，其相对密度(15.5℃)0.869，闪点 39℃，黑色，防护材料占 56%重量
	ENERGOL CPF 11	提供对表面的长期保护，溶剂蒸发后，留下了一层坚韧的塑性薄膜，有良好的防锈功能，其相对密度 0.965，闪点 35℃，黑色，防护材料占 65%(重量)
CASTROL	RUSTILO 160	用来长期保护发动机的象喷油嘴这样表面粗糙度低的备件，呈棕黑色，有溶剂，可用浸刷涂、喷雾等方法施工，薄膜厚约 35 μm，每公升覆盖 $12m^2$的面积。在室内保护期为 3 年。用石油溶剂或碱性清洁剂清除，其相对密度（20℃）为 0.876，溶剂占 49%，薄膜为硬塑性膜
	DWX 60	这种清晰呈轻棕色的油对球轴承、滚子轴承、活塞和活塞环，发动机运转机构、小型齿轮箱等提供了短期保护、它由矿物润滑油，防锈性和脱水剂抗氧剂结合而成。这种油可作冲洗油和防锈油，在室内可防锈 3 个月，它的相对密度为 0.880（20℃）
	DWX 25	这种多用途的渗透油，具有排水防护功能，它能从金属表面上排走水分，留下一层软保护膜。它能渗透到已被腐蚀的连接机构中使其活动和得到良好润滑，并使其容易拆开，这种油的相对密度（20℃）为 0.816，溶剂占 67%，生成软质脂性薄膜
	DWF	与DWX25作用相同，以喷雾器形式包装
CHEVRON	RUST PREVENTIVE	石油型防锈保护混合物，用来保护完工的金属表面及齿轮箱、轴承等
ESSO	RUST-BAN 326	半固体脂状防锈剂，能长期防止腐蚀，抵抗水分和海水的侵袭。在使用中，它的表面慢慢硬化，但下面仍保留原先的特性和良好的恢复功能。它的表面薄膜能抵抗中等磨粒，应用时加热到 55~65℃，刷涂在清洁、干燥的表面上，用浸的方法时要加热到 75~85℃。它的相对密度（15.5℃）为 0.922，滴点 66℃，针入度 249℃。
MOBIL	METAL COATING	能牢固地吸附在金属表面而保护备件
SHELL	ENSIS FLUID SDC	含有防锈添加剂和溶剂的防锈油，可用浸、涂刷和喷涂方法施工。溶剂蒸发后留下一层保护膜，除去时可用石油溶剂或一般商业上的去脂法。在一般的腐蚀环境下，室内外的防护期为 6~18 个月，此产品具有排水性，能直接用到潮湿的金属表面上。它的相对密度（15.5℃）为 0.832，闪点 32℃
TEXACO	RUSTPROOF COMPOUND L	这种防锈剂的相对密度（15.5℃）为 0.850，针入度 280℃

在使用金属防锈剂时，应参阅具体产品的说明书。主要的注意事项可归纳为：

1)需要受到保护的表面应当处于清洁状态。

2)如果该表面有湿气存在，要用排水型防护剂。

3)如要得到较长的保护时间，在涂完一度防护剂待干燥后，可以再涂一度保护剂。

4)转角和棱边处不要漏涂。

5)涂上防护油或防护剂后，未彻底干燥前，不要触及防护层。

6)记住防护剂的有效防护期限。

7)部件的工作表面不要涂会生成硬保护膜的防护剂，除非能确定使用该部件前，一定能将其清除。

8)防护剂中多含有易挥发溶剂，盛防护剂的容器的盖子必须盖严，溶剂易燃，必须远离明火。

9)涂上软膜保护层的部件尽量少触动，以防止破坏保护层而发生腐蚀。

第 5 章　使用中的润滑油的化验和维护

1　取油样的目的和方法

润滑油在使用中，会遭到淡水、海水、燃烧产物、燃油及各种杂质的污染和氧化，其性能发生变化，必须对其定期取油样化验，其目的是：了解润滑油的性能是否在许可的技术指标范围内；从润滑油中存在的问题，发现发动机和设备中存在的一些问题并加以解决。

船上润滑油品种很多，通常要化验的是使用中的主机和辅机循环系统的润滑油，如主辅柴油机油和主汽轮机油。其它的润滑油只有在特殊情况时才作化验。

为了得到正确的化验结果，也须要有正确的油样，即油样确实代表正在使用中的润滑油情况，油样取出后没有受到污染。

取油样的方法如下：

1)准备好存油样的清洁容器，许多油公司提供约 50 ml的塑料取样瓶，标签和信封，可以立即使用。如果需使用瓶子装油样，瓶子一定要彻底清洁和干燥，但切勿用柴油，汽油等溶剂来清洁。

2)主机循环系统的润滑油油样应当在船舶到港变速航行前取得。取辅机循环系统的润滑油油样和其他设备的润滑油油样，必须在正常运转时进行，如果机器已停下，必须重新起动机器，待其达到正常工作温度 10 min后才可取样。

3)在滑油冷却器和机器之间的管路上取得的油样，最有代表性。另一取样地点是滑油分油机前、后。取样时要先将放油旋塞抹净，先放走取样数量两倍以上的油，以清除聚积在旋塞或管路上的各种污染物，然后接取油样装入取样容器中。放样时间不宜过快，大型发动机放样时间应为 10 min，小型发动机放样时间应为 2 min，取样容器约装 90%容积。

4)取样容器密封后，在容器外部贴上标签，标签上填写：船名、船主、油名、取样日期、机器型号、机器运转小时、润滑油使用小时、取样部位、前次化验后每天补充的油量。然后，把油样放在阴凉干燥的地方，到港后，送有关单位化验或者将油样装入油公司提供的专用信封内，寄给他们化验。

2　使用中的柴油机油的化验项目分析

化验润滑油样的人员应当是受过专业训练取得资格的技术人员，化验仪器应当定期校核并有证明。很多油公司将化验结果以现代化通讯手段最快地告诉船舶所有人和船舶，特别是化验中发现了润滑油存在问题的时候。

由于同一油样同一项目几次化验结果不一定相同，而用不同方法化验同一油样同一项目更可能有不同结果，但化验结果又需要与过去的或其它资料相比较，因此化验报告中都注明采用的化验方法。如ASTM D 445/74　代表用美国材料试验协会 1974 年编号为D 445 的化验方法；IP, DIN, JIS　分别是英国、联邦德国、日本等有关部门制订的化验项目；GB则为我国国家标准；SY是石油工业部标准。

化验报告中列出化验项目的结果，国际上的油公司还对结果提出评价和建议，但机务人员和轮机员必须掌握各化验项目的意义和相互关系及其对发动机的影响。

2.1 相对密度

这个项目对评价使用中的柴油机油的状况没有特别的意义，但有助于操作人员正确选择分油机的调节环（比重环）。

2.2 外观和气味

这个项目对化验分析人员和轮机员都很重要，根据油的品种和用途，有经验的人员凭借外观的颜色和气味会发现油存在的一些问题，并通过化验其它项目加以证实。

2.3 粘度

这个项目测量 40℃和 100℃以下的运动粘度。为了了解使用中的柴油机油的粘度变化情况，必须知道新油的粘度。如粘度正负变化 10%，就应当查找原因；正负变化超出了许可范围，没有恢复正常以前不可使用。而且，粘度下降比粘度增大的危害性更大。

粘度变化和其它化验结果的关系如下：

（1）对于含抗氧化防锈添加剂的柴油机油：①粘度大且总酸值升高，说明油受到氧化生成油溶性酸性产物或不溶性分解产物，这是粘度增大的原因。②粘度增加且出现总碱值和不溶物含量升高，则可能是气缸污油漏入曲柄箱的结果。

（2）水分含量大，粘度增加，说明柴油机机油已产生乳化。

（3）筒状活塞柴油机油的不溶物含量高，粘度上升，可能是燃烧室中的燃烧产物和不完全燃烧产物漏入曲柄箱的结果。

（4）柴油机油的闪点下降，粘度也下降，可能是柴油污染了柴油机油，严重时会破坏润滑油膜的形成，导致轴承烧损，甚至产生曲柄箱爆炸。但重质燃料油污染柴油机油则很难从粘度闪点变化反映出来，只有另行化验柴油机油的含钒量，如超过 1 ppm，可能是重质燃料油污染所致，但这不是常规化验项目。

（5）闪点下降，不溶物上升，但粘度变化不大，这说明柴油机油受到柴油和不溶物的同时污染。

2.4 闪点

为了了解使用中的柴油机油闪点的变化情况，必须知道新油的闪点值。

国际上的油公司多数用闭口闪点这个指标，而我国却用开口闪点。同一个油样，开口闪点的化验结果高于闭口闪点。要用相同的项目作比较判断。

闪点下降通常是柴油或清洁剂污染的结果。闪点受燃油和清洁剂中易挥发成分的影响，易挥发成分越多，闪点下降越大。由于闪点下降对发动机安全运行影响很大，检查闪点的变化并查明其原因是很重要的。

柴油污染柴油机油的途径是：

1)高压油泵柱塞漏油，排放污油的管子堵塞，柴油不能放走，通过各种途径污染了柴油机油。

2)大型发动机有单独的凸轮轴循环系统，它的油与主循环系统的油相混，往往受柴油污染的凸轮轴循环系统油，污染了主循环系统的柴油机油。

3)机油滤器用柴油或清洁剂清洗后，没有被彻底吹干净。

4)某些筒状活塞柴油机缸头上有柴油管接头，这些地方漏油会沿顶杆进入曲柄箱内。

柴油机油的闪点超出许用范围而未恢复正常以前不要使用，必须查明原因，以防止继续受污染。

柴油机油由于高温产生裂化，其轻组分挥发后，闪点会上升。

2.5 水分

柴油机油在船上使用中，如发现有过量水分，必须查明其来源。

常遇到的淡水来源是：1）缸套密封圈漏水；2）活塞冷却水套管密封失效；3）分油机引水阀漏，导致边分油边加水；4)分油机作水洗分油时，操作失误，水的流量未控制好，会使大量淡水从分油机进入循环柜里；5）机油循环系统中的蒸汽加热器损坏，开启时蒸汽进入油中；6)检修时操作不当，如水套中尚有冷却水时就拆卸缸套，使水漏进曲柄箱；7）曲柄箱或循环柜的透气管未放凝结水，使凝结水进入油中；8）淡水冷却的滑油冷却器漏。

常遇到的海水（或污水）的来源是：1）海水冷却的滑油冷却器漏；2）循环柜锈烂或循环柜的连接件松动或被拆开，当舱底水位高时，水从开口处或沿着松动的阀杆填料函处进入循环柜；3）曲柄箱或循环柜的透气管在甲板上的部分锈蚀烂穿，海水沿裂口从透气管进入曲柄箱或循环柜。4）造船时管路，人孔门等需密封紧固的部位未装好。

当水进入了油中(特别是海水或舱底污水)，会使油乳化，破坏油膜，引起锈蚀，并由于水的导电作用和微电池效应，使发动机某些部位生成腐蚀麻点，严重时会损坏轴承；含清净分散添加剂的柴油机油，受到水污染后，会洗去添加剂，使总碱值迅速下降，清净分散和中和酸的能力都大为减弱，污染物发生积聚，使过滤器堵塞或分油机超载；当水中含有亚硝酸盐为主的冷却水处理剂时，还会促使细菌污染柴油机油，因为亚硝酸盐是某些细菌的食物。

柴油机油在使用中受水严重污染，其含水量超过许可指标时，应当将全部油驳到沉淀柜，清洁循环系统。驳到沉淀柜的油经处理并经化验证实这批油的技术指标回到许可范围内，才可继续使用。

2.6 盐分

盐分（氯化物含量）存在是海水污染柴油机油的结果。这个项目化验是以蒸馏水萃取油样，测量萃取液的氯化物含量，单位是%(重量)。盐分有腐蚀性，但对某台机器是否产生腐蚀取决于盐分的数量、水和强酸是否存在、所用的柴油机油的抗腐蚀能力。由于含洁净分散添加剂的柴油机油抗腐蚀能力较强，它的许可盐分控制指标高于仅含抗氧防锈添加剂的柴油机油。

清除盐分只能通过离心分油将海水清除。

2.7 不溶物和机械杂质

试验这个项目时，通常是将一定数量的油样溶于某种溶剂里，用经过处理的滤垫或定量滤纸把不溶的固体物质过滤出来，它们的重量与油样重量之比，以重量百分比表达，即不溶物含量。由于不同的溶剂溶解的物质不相同，得出的结果就不一样，因此化验报告都注明用什么溶剂，用的溶剂是正庚烷或戊烷，得到的化验结果称为正庚烷不溶物或戊烷不溶物。用的溶剂是甲苯，得到的化验结果称为甲苯不溶物。甲苯可以溶解柴油机油中的氧化产物，因此得到的结果在数值上小于正庚烷或戊烷不熔物，其差值反映了柴油机油的氧化物含量。如

果使用多种溶剂，把有机物全部溶解，得到的结果是机械杂质。

不溶物主要包括：炭粒、灰分、固体污染物、锈、磨损粒子和磨料，有时还有盐粒。柴油机油不溶物过高，如无柴油污染，通常粘度会增加。柴油机油中的清净分散添加剂能将部件表面上的污染物洗到油里并将其分散为微小的、滤器无法滤去的悬浮固体物质。有效添加剂的含量，从总碱值反映出来。总碱值大，柴油机油承受的污染物就多，当然，污染物超过柴油机油能承受的能力，污染物就会凝聚，降低发动机的清洁性，堵塞油路，影响安全，因此不溶物的许可数值和总碱值有密切关系：高总碱值柴油机油的正庚烷或戊烷不溶物许可数值可达3%～6%，但对仅含抗氧防锈添加剂的柴油机油，正庚烷或戊烷不溶物的许可数值在1%以下。

含抗氧防锈添加剂的柴油机油，如果总酸值变化迅速，要化验甲苯不溶物和正庚烷（或戊烷）不溶物，从相差值确定柴油机油是否氧化严重。

低速柴油机油不溶物污染的来源主要是：造船时油柜、管路未经彻底清洁，气缸污油漏入曲柄箱，污机油加到循环柜中，检修时不慎，让污染物落入发动机内，污水漏入发动机内。中速柴油机油不溶物污染物来源，除上述有关原因外，主要是燃烧产物、燃气、不完全燃烧产物进入曲柄箱。

降低不溶物含量，先要找到污染物的来源，并加以消除；正确操作分油机和各种过滤器，及时清除不溶物。

2.8 总碱值

这个指标反映含清净分散添加剂的柴油机油使用中的有效添加剂的含量，也就是油的清净分散性能、抗磨损能力和中和进入曲柄箱的酸性物质的能力。使用中的柴油机油的总碱值总比新油的总碱值低，新油在刚使用的几百小时内，总碱值下降较快，随着油的消耗和补充，总碱值保持在一定范围内，变化较少。

柴油机油在使用中如遇到水污染，总碱值会急剧下降。如果没有水污染，中速柴油机油总碱值快速下降的原因往往是活塞环和缸套的密封状态不好，燃烧不良，燃气漏入曲柄箱内。低速柴油机油总碱值快速下降的原因可能是活塞杆填料箱密封不好，酸性物质进入曲柄箱的缘故。

总碱值过低，要找出原因，并予以改正，特别是发动机本身存在的问题。同时，要补充新油或可与原用油相混的总碱值更高的新油，使其恢复到原来的总碱值。当然，如果总碱值长期过低，应当考虑换用总碱值较高的柴油机油。

2.9 总酸值、中和值、强酸值、pH值

含清净分散添加剂的柴油机油不需要化验这些项目，只有含抗氧防锈添加剂的柴油机油需要化验这些项目。

总酸值是柴油机油中的有机酸和无机酸的总和，有的油公司又叫它为中和值。柴油机油氧化会生成油溶性的有机酸，对铜铅合金轴瓦有腐蚀作用；而燃气中的三氧化硫或酸性的气缸污油漏入曲柄箱则形成无机酸，化验时，无机酸的含量用强酸值表示，国内则化验水溶性酸，定性测定。由于无机酸存在的机会不多，一些油公司测量油的水萃取液的pH值，pH值低于4才化验强酸值。

低速柴油机的气缸和曲柄箱有隔板分开，上述酸性污染物能进入曲柄箱，说明填料箱的

密封状态不良，必须查清是哪个填料箱有毛病，必须立即进行检修。由于无机酸有强烈的腐蚀作用，柴油机油中不允许它存在。如果油中同时含有海水，其腐蚀的危险性更大。在这种状态下除检修填料箱外，还要加强分油以清除海水，以后，再补充含清净分散添加剂的柴油机油去中和无机酸。如果柴油机油多次化验发现有强酸，一时又清除不了，最好改为使用含清净分散添加剂的柴油机油。

如果没有强酸值，这时，总酸值主要反映有机酸的情况。有机酸过高，跟油局部遇到高温热负荷太大或过多接触空气而发生氧化有关，同样要查清原因。化验甲苯不溶物有助于分析这个问题。

各油公司和发动机制造厂对柴油机油的总酸值和强酸值都作了一些规定，数值不同，但都应强调：

1)强酸值，不允许存在。

2)总酸值超过 1 mgKOH/g，要查清原因。

3)总酸值的变化值比绝对值更重要。

4)如果没有强酸存在，允许总酸值达到较高的数值。

2.10 金属含量

MOBIL公司对使用中的柴油机油除作常规项目化验外，还化验使用中的柴油机油的金属含量。他们先确定了使用中的柴油机油中正常金属含量的平均值，以后的各次化验中，当发现某种金属含量超过平均值时，就需查找原因。表 2.3.5-1 为金属含量超过平均值时的原因分析。

表 2.3.5-1　金属含量超过平均值的原因分析

含量超过平均值的金属名称	原　　因
铁（Fe）	机械零件磨损；金属与金属接触；腐蚀；磨粒磨损
铜（Cu）	机械零件磨损；金属与金属接触；腐蚀；磨粒污染；填料箱环磨损；活塞减磨环磨损
铬（Cr）	机械零件磨损；金属与金属接触；腐蚀；磨粒污染
铅（Pb）	轴承磨损；金属与金属接触；磨粒污染；磨蚀；机械零件磨损
铝（Al）	机械零件磨损；金属与金属接触；磨粒污染；当含硅量也高时，则属燃油中的催化剂污染
硅（Si）	硅可能是磨料，也可能以非磨料的抗泡沫添加剂的形式存在；密封材料或粘合剂；如果磨损金属多，硅通常是磨料；如果含铝量也高，可能是燃油中的催化剂污染
钠（Na）	海水污染，冷却水污染
锰（Mn）	海水污染
钒（V）	重质燃料油燃气漏入；重质燃料油污染
锌（Zn）	锌污染来自含锌化合物的机油或镀锌容器或管子材料，锌化合物对EMD发动机的银轴承有害
银（Ag）	多数EMD发动机有银轴承，含银量过量说明轴承磨损
硼（B）	冷却水污染
镍（Ni）	重质燃料油燃气漏入；重质燃料油污染
锡（Sn）	轴承磨损；金属与金属接触；磨粒污染；腐蚀；机械零件磨损

金属含量的化验是船舶动力装置现代化养护管理中的一个发展中的项目，要进一步完善才能准确地从金属含量的趋向分析中发现和查找柴油机油和发动机存在的问题。

2.11 柴油机油在使用中的控制技术指标

柴油机油在使用中总要发生变化，跟新油的指标不一样，允许柴油机油在一定的技术指标范围内使用，也就是说，柴油机油使用中的指标必须保持在控制技术指标的范围内。

对于油量很多的柴油机油循环系统，当某项技术指标超出控制技术指标时，首先查找原因，采取措施使该项指标回到正常范围，只有经过化验确定该油已严重变质无法挽救时才能换油。

柴油机油在使用中的控制技术指标，油公司和发动机制造厂都已提出。由于两者所处的位置不同，其数值有相同的亦有差异的。表 2.3.5-2 列出某些油公司和发动机制造厂关于柴油机油在使用中的控制技术指标。

表 2.3.5-2 柴油机油在使用中的控制技术指标

油公司 发动机厂	柴油机油品种	粘度 (mm²/s)	闪点 (℃)	水分 (%容积)	盐分 (%)	总酸值 (中和值)	pH值	强酸值	总碱值	正庚烷或戊烷不溶物 (%)	燃油稀释 (%)
SHELL	非清净分散添加剂柴油机油 清净分散添加剂柴油机油	≯50%原粘度 ≮25%原粘度	>150 (闭口)	< 1	0.005 0.01	<4.0 (无强酸) <2.5 (有强酸)		无 —	— > 3 倍燃油硫分值	< 1 <5	
PIEL-STICK			低于新油 50, 最低 150	0.2～0.5					>6(烧轻燃料油) > 12（燃油硫分< 1.5%） > 16（燃油硫分 1.5%～2.5%） >20（燃油硫分> 2.5%）	< 3 最大 5	
MAN-B&W L-MC/MCE 发动机				<0.2					> 1		
SULZER RTA发动机		≮10% 原粘度	>180	<0.2		<1.0		无		正庚烷不溶物 <0.5 苯不溶物< 0.3	

续上表

油公司发动机厂	柴油机油品种	粘度(mm²/s)	闪点(℃)	水分(%容积)	盐分(%)	总酸值(中和值)	pH值	强酸值	总碱值	正庚烷或戊烷不溶物(%)	燃油稀释(%)
ELF	ATLANTA MARINE 30	>95	—	<1	无	<0.8		无	—		<5
	ATLANTA MARINE DX 30	>95	—	<0.5	无	—		无	>3	<0.6	<5
	ATLANTA MARINE DX 30(用于付机)	>95	>190	<0.5	无	—		无	>6	<0.2	<5
	ATLANTA MARINE 3015	>95	>190	<0.5	无	—		无	>6	<0.2	<5
	ATLANTA MARINE 4015	>130	>190	<0.5	无	—		无	>6	<0.2	<5
	ATLANTA MARINE 3030	>95	>190	<0.5	无	—		无	>15	<2	<5
	ATLANTA MARINE 4030	>130	>190	<0.5	无	—		无	>15	<2	<5
	ATLANTA MARINE 4040	>130	>190	<0.5	无	—		无	>15	<2	<5
	ATLANTA MARINE 3040	>95	>190	<0.5	无	—		无	>15	<2	<5
CASTROL		<±20%~25%原粘度	>160	<0.2(非清净剂油) <0.5(重负荷油)	无 无	<1	4-11	无	>60%原总碱值	<1(MARWE HEAVY) <3(MPX) <6(MXD)	
BP	含抗氧防锈添加剂 OE-M 30		>150(闭口)	微量	无	<2.0	—	无	—	<2.5	
	含清净分散添加剂 DL-MP 30		>150(闭口)	微量	无	—	—	无	>2.0	<5	
ESSO	EXXMAP XP	>94, <138(40℃)		<0.5	无	<0.4	4~8.5	无	—		
	EXXMAP XA	>94, <138(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>3.0		
	EXXMAP 12 TP 30	>95, <140(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>4.0		
	EXXMAP 24 TP 30	>95, <140(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>7.0		
	EXXMAP 30 TP 30	>95, <140(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>16.0		
	EXXMAP 12 TP 40	>124, <183(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>4.0		
	EXXMAP 24 TP 40	>124, <183(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>7.0		
	EXXMAP 30 TP 40	>124, <183(40℃)		<0.5	无	—	4~8.5	无	>16.0		
	EXXMAP 40 TP 40	>124, <183(40℃)		<0.5 >0.5时检查盐分	无	—	4~8.5	无	>24.0		
MOBIL	DTE 3	83~143(40℃)		<0.1					—	<2	<5
	DTE 4	110-218(40℃)		<0.1					—	<2	<5
MOBIL	MOBIL GARD 300	83~143(40℃)		<0.2					>2	<3	<5
	MOBIL GARD 312	83~143(40℃)		<0.2					>5	<4	<5
	MOBIL GARD 412	110~218(40℃)		<0.2					>5	<4	<5
	MOBIL GARD 324	83~143(40℃)		<0.2					>10	<6	<5
	MOBIL GARD 424	110~218(40℃)		<0.2					>10	<6	<5
	MOBIL GARD 442	110~218(40℃)		<0.2					>10	<6	<5

3　其它润滑油在使用中的化验分析

汽轮机油、液压油、齿轮箱油、冷冻机油等在使用中逐步发生变化。某些船上大型循环系统的油量很大，这就要定期取样化验。根据化验结果，判定油是否能继续使用如发现存在问题，应立即加以解决。但这些油多数用在较小型的船用机械设备上，贮油量很少，通常在检修设备时换油，或者按说明书规定期限换油。

3.1　取样地点

（1）汽轮机油　机油冷却器出口处或分油机进、出口处。
（2）液压油　从主贮油柜中部取样或运转时从回油管上取样。
（3）齿轮箱油　冷却器和齿轮箱之间取样，如齿轮箱为喷溅润滑，在贮油器中部取样。
（4）压缩机油　在贮油器中部取样。
（5）冷冻机油　在贮油器中部取样。
取样方法请看本章第一点。

3.2　主要化验项目

（1）汽轮机油　外观、水分、运动粘度（40℃）、总酸值、不溶物。
（2）液压油　外观、水分、氯化物、运动粘度（40、100℃）。
（3）齿轮箱油　外观、水分、氯化物、运动粘度（40℃）、不溶物。
（4）冷冻机油和压缩机油　外观、水分、运动粘度（40℃）、不溶物、总酸值。

3.3　化验结果的分析

将化验结果和新油的相应指标比较，如果变化不大，在控制指标范围内，油是正常的；如果变化比较大，就要查找原因。例如水分较大，要弄清水的性质和从何处来，是否使油乳化；如果不溶物和总酸值都有了较大的增加，说明油已强烈氧化，要查清原因；对于总酸值，不但要知道其绝对值，还要跟过去的记录联系一起看其变化情况；如果总酸值变化不大，但不溶物升高，要查找是机器本身的磨损粒子，还是外界进入的污染物；粘度升高可能是氧化、污染或乳化的结果。总之，对各种较大变化的迹象都要引起注意和警惕，查清其原因。如果化验结果超出控制指标范围外，就要立即采取分油或过滤等措施，使油恢复到许可指标范围内。如果采取了措施仍恢复不了，就要换油或者部分换油。

3.4　控制技术指标

一些油公司的控制指标可作为实际工作中的参考，当油的指标出现表 2.3.5-3 和表 2.3.5-4 的数字时，该油就不能使用。

1)汽轮机油，见表 2.3.5-3。

表 2.3.5-3　　汽轮机油控制指标

油公司	油　名	运动粘度 40℃ (mm²/s)	总酸值 (mg KoH/g)	水分 (%)	盐分	不溶物	外观
ESSO	TROMAR T TROMAR TEP	<66 或>89 <66 或>89	0.4 及其以上 0.4 及其以上	0.3 及其以上 0.3 及其以上	存在 存在		
ELF	TURBINE T 68 TURBINE T 100	>50%原粘度 >50%原粘度	0.3 及其以上① 0.3 及其以上①	0.5 及其以上 0.5 及其以上	存在 存在	存在 存在	变黑 变黑

① 主要观察总酸值的变化速率。

2）液压油，见表 2.3.5-4。

表 2.3.5-4　　液压油控制指标

油公司	油　名	外　观	不溶物	水分	氯化物	粘度（40℃）	粘度（100℃）	粘度指数
ELF	VISGA 32	变黑	存在	≥0.2%	存在	>50%原粘度	>50%原粘度	<130
	VISGA 46	变黑	存在	≥0.2%	存在	>50%原粘度	>50%原粘度	<130
	VISGA 68	变黑	存在	≥0.2%	存在	>50%原粘度	>50%原粘度	<130
	VISGA 150	变黑	存在	≥0.2%	存在	>50%原粘度	>50%原粘度	<130

4　主柴油机油和主汽轮机油在使用中的维护

要确保主柴油机油和主汽轮机油的技术指标在控制指标范围内，并使其使用寿命长，在使用中就要采取一系列的维护措施。

4.1　沉淀

用过的润滑油，里面的碳粒、水和其它固体物质，其相对密度都比油大，因此船舶抵港后，若时间许可，可将循环系统中全部润滑油驳至沉淀柜（再生柜）中，再加热到 60～70℃，然后静置一段时间，让不溶物和水分沉淀下来，并从下部的泄放阀放走。这样可以改善油的状况。起动主机前，通过分油机将沉淀柜里的全部油分油回到循环柜。

如果循环系统中的油受到严重污染，要立即采取措施消除，并要通过化验结果证实其已达到目的。如果来不及这样做，应采取上述沉淀方法以解决油严重污染的问题，并要彻底查清其污染原因。循环系统需经过清洁，充入新油供使用。

4.2　分油

发动机起动前，就要先分离全部发动机油；发动机运行期间，除拆开分油机清洗期间外，分油机都要保持连续工作。

分油要得到良好效果，要做好下列几方面：

1）选择合适的调节环（比重环）和调节螺钉（比重螺钉）

根据油的相对密度和预定的分油加热温度，从说明书中查找合适直径的调节环或调节螺钉（有的日本产分油机要查找上、下调节环），根据使用效果是否良好，再定是否需改换调节环或调节螺钉。因为较大直径的调节环，较易分离出水分和不溶物，但有跑油（润滑油从出水口跑走）的可能；较小直径的调节环，不易跑油，但可能一部分水和不溶物没有分离出来。

2）分油流量

各种润滑油要按情况掌握流量。流量较小，分油净化效果较好，但通过次数却减少了。

低速柴油机油：按分油机额定流量的 1/3 上下进行分油，能得到较好的效果。如果油的污染严重，需降低至额定流量的 20%分油，如果油很清洁，可以按 50%额定流量进行分油，

每 24 h应能将全部润滑油分离 1.5～2.5 次。

筒状活塞柴油机油：按分油机额定流量的 20%进行分油，每 24 h应能将全部润滑油分离 3～5 次

汽轮机油：以低于分油机的额定流量的 2/3 进行分油。

3)分油温度

达到下面要求的分油温度，才能把油分离干净。加热器要定期清洗检修，特别是电加热器。损坏的加热元件要及时修理或更换。

各种润滑油的加热温度如下：

低速柴油机油：75～85℃。

筒状活塞柴油机油：不低于 80℃，最好是 85～90℃。

汽轮机油：60～70℃。

4)分油机转速，转速指示器显示的转速应达到铭牌上规定的数值。

表 2.3.5-5 和表 2.3.5-6 是ALFA-LAVAL 分油机制造厂推荐的分油参数。

表 2.3.5-5　ALFAX 系列分油机分离润滑油参数表

分油机牌号	额定流量 (l/h)	推荐的分油流量 (l/h)			
		含抗氧防锈剂低速柴油机油	含清净分散剂低速柴油机油	含清净分散剂筒状活塞柴油机油	汽轮机油
		加热温度 (℃)			
		80～90	80～90	80～90	60～70
WHPX 405	4700	1400～1600	1200～1400	800～1000	3100
WHPX 407	9000	2700～3200	2300～2700	1600～2000	5900
WHPX 409	12500	3800～4400	3100～3800	2300～2800	8100
WHPX 410	16000	4800～5600	4000～4800	2900～3500	10400
WHPX 513	24500	7400～8600	6100～7400	4900～5400	15900

表 2.3.5-6　ALFA LAVAL 分油机分离润滑油参数表

分油机牌号	额定流量 (l/h)	矿物型润滑油		含清净分散剂润滑油		汽轮机油
		旁通分油		旁通分油		
		流量 (l/h)		流量 (l/h)		
		最大	最适宜	最大	最适宜	
		分油温度 (℃)		分油温度 (℃)		分油温度(℃)
		75～80	75～80	80～85	80～85	60
MAB 103	1300	950	390～460	550	230～290	950
MAB 104	2200	1600	670～780	950	390～490	1600
MAB 204	4300	3100	1300～1550	1900	750～950	3100
MAB 205	6500	4800	2000～2300	2900	1150～1450	4800
MAB 206	9500	7000	2900～3400	4300	1700～2100	7000
MAB 207	12500	9300	3800～4500	5600	2200～2800	9300
MAB 209	21000	15400	6300～7400	9300	3700～4600	15400

续上表

分油机牌号	额定流量 (l/h)	矿物型润滑油 旁通分油 流量 (l/h) 最大		含清净分散剂润滑油 旁通分油 流量 (l/h) 最大		汽轮机油
			最适宜		最适宜	
		分油温度（℃）		分油温度（℃）		分油温度（℃）
		75～80	75～80	80～85	80～85	60
MAPX 204	2700	2000	800～1000	1200	500～600	2000
MAPX 313	21500	16000	6600～7700	9600	3850～4800	16000
MOPX 205	4900	8600	1500～1750	2200	900～1100	3600
MOPX 207	7400	5400	2300～2650	3300	1300～1650	5400
MOPX 209	11800	8700	3700～4200	5200	2100～2650	8700
MOPX 210	14000	10400	4350～5000	6200	2500～3150	10400

5）分油机用水

分油机的水封用水和冲洗用水应当至少保持 50℃ 才可使用，因此重力水柜要保持在加热状态。如果上述用水采用冷水，分油机自动排渣就不彻底，会造成分离盘上部堵塞，甚至产生密封不好和机组震动等故障。

6）水洗分油问题

由于水洗分油只适合不含添加剂的矿物润滑油，而这种油在船上已很少使用。水洗分油会破坏润滑油中的添加剂，并使润滑油有乳化的危险，因此，不需要水洗分油。

7）乳化润滑油的分油问题

严重水污染使润滑油稳定乳化时，如果经沉淀和连续分油仍不能除水，这时可认为这批油由油和乳化油两态组成，乳化油作为重态。这时，要通过改用不同直径的调节环(比重环)设法分离出乳化油，这样做可能损失一定数量的油，但大多数油得以保存。

4.3 过滤器

大型润滑油循环系统中有各种各样的过滤器：粗滤器、细滤器、磁性滤器、自动排放滤器。滤器元件的材料也是多种多样的。这些过滤器应当定期清洗，使润滑油得到有效过滤。

有些循环系统中还装有旁通过滤的CJC过滤器，这些过滤器要充分利用，按期更换滤芯。

4.4 润滑油冷却器

污脏的冷却器热交换能力下降，使润滑油的热量不能被带走，加速其氧化。冷却器上的沉淀物也是润滑油氧化的催化剂，因此冷却器的油面和水面要定期清洁和试压。

4.5 循环油柜

1）如果有两个循环油柜，一个作主用，一个当备用，两个柜不能互通，但能很快调换使用，循环油柜的油尺必须保持在规定位置。

2）每年把循环油柜的油驳到沉淀柜内，然后彻底清洁循环油柜一次。

3）当发动机检修时，最好关上发动机曲柄箱和循环油柜之间的截止阀，检修完要检查清洁曲柄箱。

4)新船投入使用，要检查循环柜的人孔门和连接件是否紧密。船舶使用多年，要定期检查循环柜钢板是否锈烂，如锈烂了要及时修理。

4.6 沉淀柜（再生油柜）

1)每年要清洁一次。

2)平时要放空备用，不可把沉淀柜当贮存柜用。

3)加热管要处于良好状态。

4.7 透气管放水

循环柜和曲柄箱的透气管的放水阀和管路保持畅道无阻，使凝结水及时排走。

4.8 中间轴接地设备

一些船上的中间轴装有接地设备，这些设备要保持正常工作，使螺旋桨轴产生的散杂电流不至于进入发动机，以产生电化腐蚀。接地设备的正常工作，既保护了发动机，也保护了润滑油。

4.9 保护润滑油不受细菌污染

柴油机油的细菌问题有时很严重，一个晚上可使曲轴受到腐蚀，主要原因是柴油机油受带菌水的污染。细菌能在油中生长的环境因素是:（1）油温低于50℃。（2）大量水漏入油中。（3）有足够的细菌食物，如亚硝酸盐存在。一些管理差的旧船，可能具备上述三方面的因素，于是油最易受细菌污染。

柴油机油产生细菌问题的表现是:

1)柴油机油遭到乳化;

2)柴油机油外观呈粘滑状态;

3)轴颈上包着一层黑灰色或黑色沉淀物;

4)曲柄箱中有一股阴湿的气味;

5)加工表面，特别是新加工表面受到非常迅速而严重的腐蚀。

证实是否被细菌污染，还是要通过化验。用消过毒的容器取油样交给有资格的细菌学家分析细菌是否存在，数量多少，有哪些品种。

如果经化验确定有有害细菌存在时，应采取的措施是:（1)全部柴油机油废度，最好驳入燃油舱当燃油烧掉;（2)用一种由油溶性细菌处理过的冲洗油将循环系统彻底清洗，用一种由水溶性细菌处理过的产品对冷却水系统作处理，至于采取哪种措施，要由专家确定。

5 润滑剂的代用

在购进旧船时，原来用的润滑油牌号跟准备用的润滑油牌号不一样，或者，在一些港口，加不到原用牌号的润滑油，要用其它牌号的油来代替，这时就产生了润滑剂的代用问题，即两种不同牌号的同类润滑剂是否能混合贮藏和混合使用的问题。

这个问题应由待用牌号的油公司来回答。该油公司不仅要说明两种不同牌号的新油可以一起贮藏和使用，还要说明正在使用的油和待用的新油是否可一起使用。

为了充分利用原来的润滑油，管理人员对下列油可作这样处理:

1)原用的主、辅柴油机油或主汽轮机油，需取样化验。如果化验结果说明其技术指标超出了许用范围，即使已证明原用新油和待用新油可以相混使用，那么补入新油也纯属浪费，这时要作换油处理。如果化验结果证明原油的技术指标在许可使用的范围内，又可跟新的待用油混合使用，新油补充入循环系统时，一次不要太多，以不超过循环系统存油的10%为宜，

2)气缸油：如果原用油和待用油不能相混贮存使用，只有一个气缸油贮存柜需安排在原用油用完或将用完时将油柜彻底清洁干净，方可换上待用气缸油。如果有两个气缸油贮存柜，最好将原用气缸油集中到一个油柜，清洁另一个油柜，补充待用的新气缸油，等原用气缸油用完后，清洁该油柜并换用新气缸油。

3)其它品种的润滑剂的代用，如果未能确定新旧品种是否能相混使用，最好仍是把原用油用完或即将用完时，结合检修，将油更换为新油。

第 6 章　节约润滑油

节约润滑油是节能工作的组成部分。

节约润滑油包括两方面：1）降低每吨润滑油的费用；2）在确保机器正常运转的基础上，减少润滑油的消耗。若上述两方面都能实现，则润滑油的总费用下降，企业成本降低。

1　降低每吨润滑油的费用

润滑油的费用由基本油价、运输费和包装费所构成。降低其费用要做到：

1)选好合适的油公司和加油港

（1）每条船在建造或接船前都要选定加哪个油公司的润滑油，选定以后很少改变。各油公司的经营管理方法不同，在不同地区的优势也不同，各公司同一质量水平的油，在同一港口的价格是不同的；而同一公司的某种油，在不同港口的价格也是不同的。因此船舶所有人主管部门要了解各油公司的价格，特别是净价，根据常去的航线，选好今后加油的合适的油公司，这对润滑油费用的降低有很大关系。

（2）由于不同港口的油价不同，有时甚至相差很大，在安排加油时，应选择航次中经过的各个港口中油价最低的港口加油。有些船舶所有人为此改装油柜，在油价低的港口尽量多装油。

（3）选用合适品种的润滑油。油公司提供的用油目录表规定了船上各种机械设备的用油，这目录表主要按主机烧高硫燃料油为出发点选定品种，这是非常必要的。但在具体情况下，有些品种需要重新考虑。如船舶航线上常加的主机燃油是低硫燃油，所用的气缸油选取中碱或低碱气缸油比高碱气缸油更合适，所用的柴油机油的清净分散水平可以不必太高。又如某些辅机用的是超低硫柴油，所用的柴油机油应选取相应的总碱值，这样既符合发动机说明书关于燃油硫分和总碱值相配的要求，又可节约润滑油的费用。某些设备严重漏油，一时又修不好，就不宜选取质量水平高的油。但是，这些品种的改变，要建立在科学基础上，既能使机器安全运转，维修保养效果和时间正常，又能降低润滑油费用，同时，还要有关方面共同协商取得统一意见。

（4）油的品种不宜定得太多，由于每种油都要有备用，品种太多会造成贮存上的浪费。

2)减少运输费用

（1）在同一个港口内加油，有的油公司按船舶停泊区域的远近收取不同的运输运费，应在船舶停泊区域最近时或者在靠码头时安排加油，以支付较少的运输费用。

（2）许多油公司规定了加油的最低数量，如每次桶装加油不得少于 4 桶，低于此数量要另收运费，因此一条船加油要集中于一次，不要每次只加 1 ～ 2 桶油。

3)尽量散装加油

散装加油比桶装加油（包括用油泵从桶中泵油供应）便宜，但不是每个港口都能散装供油，因此要尽量安排在有散装加油价格比较低的港口加油，同时要清楚油公司规定的最低散装供油数量，以做到符合散装油的要求。

降低每吨润滑油的费用，与主管加油人员有很大关系，主管人员责任心强，熟悉情况，有较高的技术业务水平，将能取得较好的经济效益。

2　防止润滑油突然变质

润滑油的消耗有两个方面，一是变质报废，二是使用中消耗。节约润滑油要从“质”和“量”方面着手。

除气缸油外，多数润滑油在使用过程中性能都起了变化，可能因氧化和污染性能变坏，也可能经过滤，分油和补充新油而改善，这些变化是正常的逐步发生的变化。

但如由于种种原因，润滑油的性能一下子就超出了许可的技术指标范围，无法采取挽救措施或挽救不了，只能将润滑油报废或降级使用，这属于不正常的大量消耗，损失有时会很大，例如：

1)加油时操作错误，把这种油错加到另一种油的油柜中去。如果把柴油机油装到气缸油柜中，这样，原来气缸油柜中的气缸油就不能作气缸油使用了。

2)露天存放的桶装油不加防护，不及时消除桶面积水，使桶生锈腐烂，进水污染了油；或者是失去油名文字，弄不清是什么油而不能再用；或者是打开桶盖取油后，盖没关好，使油遭水和污物严重污染而不能再用。这类消耗也是不正常消耗。

3)最严重的是主机用油，在使用中由于各种原因遭到淡水、海水、污水或燃油的严重污染，如果挽救无效，可能损失十几吨到几十吨油!

因此防止润滑油性能突然变坏，对船舶安全和节约润滑油有重要意义。而要做到能防止润滑油性能突然变坏，只能做好预防工作：要提高轮机人员的责任心和技术业务水平，健全规章制度和操作规程，这样才可避免这类事情出现。如果确实发生了润滑油变质，应当查清原因，真正吸取教训，并采取一切措施挽救损失。

3　降低润滑油的消耗量

润滑油在使用过程中逐步被消耗，要判别是否是正常消耗，并避免和减少不正常消耗，才能真正做到降低润滑油的消耗量。

3.1　准确记录消耗量

要用专门的本子定期记录：

1)加润滑油的牌号和数量；

2)各贮存柜、沉淀柜、日用柜中现存润滑油牌号和数量，桶装油的牌号和数量；

3)主辅机和重要的用油设备在循环柜或油底壳的油尺位置；

4)每次往上述设备补充油的时间和数量；

5)每次换油的日期和数量。

记录本是一种技术管理资料，不能因人员变动而中断。记录的数字准确无误，就可知道正常情况下各设备的润滑油消耗量。如某种油或某设备的耗油量突然增加，这就比较容易发现问题来自哪里，能较快地查到原因和减少不正常的消耗。

即使较准确地掌握了各种设备正常的润滑油消耗量，这个消耗量是不是最节约的消耗量，还要作进一步探索，弄清润滑油是如何消耗的，有哪些方面可以避免和减少消耗。

3.2 气缸油的消耗

气缸油是船用矿物润滑油中最昂贵的油，也是用量较大的油。气缸油由注油器注入气缸，通常其消耗量随负荷升高或降低而增或减。回流扫气柴油机的气缸油消耗量高于直流扫气柴油机；长冲程柴油机的气缸油消耗量高于短冲程柴油机；磨合期间的气缸油消耗量高于正常运转时消耗量。

发动机说明书显示了某个负荷下气缸油消耗范围是每千瓦小时从多少克到多少克，例如：0.7～1.4 g/kwh，这是个参考数字，范围比较大，要从中找到一个合适的数字需要经过一番努力。由于发动机所用燃油硫分，负荷、检修间隔等因素影响，同一型号同一功率的发动机气缸油消耗量不一定相同，因此轮机长研究这个问题，要作一些调查：

1)现在的气缸油实际是多少；

2)在吊出活塞时或者从扫气口检查气缸壁和活塞表面、环槽和活塞环的情况，看润滑是否不足还是过分；

3)发动机运转过程中气缸放出污油数量；

4)扫气道里面积聚的污油数量。

弄清情况后可以作出判断，但这些因素很难作出定量判断，主要仍靠轮机长和主管人员在现场按照经验作出判断，如润滑不足或润滑过分，对该缸的供油量就要作调整。调整要逐步增加或减少，不要变化太大。

有人认为润滑过分比润滑不足好，至少可以确保安全，甚至把磨合时的气缸油消耗量保留为正常运转时的消耗量，这样理解是不全面的。润滑过分，多余气缸油跑到扫气道，容易产生着火危险；如果烧低硫燃油，还会因多余的添加剂得不到消耗而沉淀下来，增加气缸磨损。当然也不能反过来说消耗量越少越好。应当是经过长期的观察，找到一个最适合于本发动机的油消耗量，既确保安全，使磨损和检修间隔都正常，又没有浪费。

3.3 降低筒状活塞柴油机油的消耗

这种柴油机油的消耗通常来自下列方面：

1)从发动机或其循环系统漏走，可能是：

(1)润滑油冷却器管子有故障，油从这里漏走，这种情况较少，但难以发现。因此，冷却器要按期检修试压，

(2)自动冲洗的全流过滤器在清洁时，要损失一些油；

(3)分油时因水封损失而跑油，有时这种损失很大。例如，有种自动排渣分油机，在排渣前要切断供油和用水冲洗分油盘，每次排渣要损失 0.5～2 L的油，如果该分油机一年工作300 天，一天排渣 12 次，就要损失 7200 L的油。

(4)机油泵轴封漏油，很少发生，一旦发生，亦易于发现。

(5)发动机曲轴轴封漏油亦很少发生，即使发生，也易于发现。

(6)曲柄箱门漏油，易于发现，损失一定数量的油。

2)柴油机油漏过活塞环，在燃烧室中被烧掉，这方面的耗油量很大，主要原因是发动机的活塞环，刮油环和气缸套磨损严重引起。另外，活塞销的密封不良也会使部分柴油机油跑到燃烧室里被烧掉。刮油环刮下的柴油机油回到曲柄箱的通道不顺畅也会增加消耗。

3)柴油机油气化蒸发跑出曲柄箱，温度越高，柴油机油挥发得越厉害。

因此，降低筒状活塞柴油机的消耗，主要是：（1）搞好发动机的检修。气缸套、活塞、活塞环、刮油环、各种轴封、机油冷却器，曲柄箱门都要定期检修，消除漏油。（2）分油机在使用中，要选择正确的分油参数，自动排渣时间间隔过短使油损失较多，要寻找比较合适的时间间隔。（3）自动冲洗过滤器在冲洗时带走的油尽量回收使用。许多发动机的循环系统中亦设有管路，使这部分油回到分油机在循环油柜的吸入口。

3.4 降低低速柴油机油的消耗

这种油的消耗通常是：

1）从发动机或发动机的循环系统漏走，其情况与在筒状活塞柴油机中的情况大致相同，所不同的是：低速柴油机的填料箱如得不到及时检修，密封环之间失去间隙，不能密封活塞杆，在活塞杆运动行时，会把大量柴油机油带到气缸下部空间，油多时流到扫气道或从气缸污油管流走，严重时耗油量很大，必须及时检修填料箱。另外，油冷却的组合活塞接合面如安装不好，也会发生渗漏。

一些新型柴油机的填料箱，按其设计有油流出，这些油应集中到一个专用油柜，因为这部分油可能受到气缸污油所污染，必须经沉淀，分油和经化验证明合格后方可驳回主机循环系统中使用。

2）气化蒸发跑出曲柄箱。

降低低速柴油机的消耗量的方法，与降低筒状活塞柴油机的消耗量相同，

3.5 降低其它润滑油的消耗

1）漏油处及时进行检修，特别是露天高压油管，如果腐蚀严重要及时更换，防止炸管损失大量油。

2）人工加油部位加油要适量。

3.6 报废润滑油的处理

已报废的润滑油，应送交有关部门回收。如果没有机会，可以按低比例掺入到燃料油中烧掉。

第4篇 涂 料

第1章 概 述

1 涂料的含义

船舶航行于大海、江河、湖泊之中，浸水部分将遭受水介质的腐蚀及海洋生物的污损。迄今为止，防止这类腐蚀的方法有涂层保护法与阴极保护法。船舶常用的是涂层保护法，其浸没于海水的船底部位辅以阴极保护法。涂层保护法，常指利用涂覆在船舶钢板表面上的涂料。

涂料是一种含油的或不含油的有机高分子胶体混合物的液体或粉末，通常是以有机高分子胶体为主体的粘液状混合物。通过手刷、滚涂和机械的喷涂方法，将涂料涂敷在物体表面，形成一定厚度的薄膜，对物体具有保护、装饰和特殊功能的作用。最早的涂料是用植物油和天然漆做原料的，称之漆。随着化学工业的发展，过去植物油、天然漆和其它天然产物为原料的漆已经逐渐为各种有机合成的树脂及改性油或合成油所代替。后者比天然油脂效能好，经久、牢固，并且有异乎寻常的特殊性能。例如较高的漆膜硬度、光亮持久性、抗酸碱性、抗燃性、绝缘性等等。所以新型的合成树脂漆，已经趋向少用油或完全不用油，而改用有机合成的各种合成树脂，所以“涂料”之称，能科学地反映材料真正的含义。只是“油漆”二字沿用很久，已成习惯。但广义而言，用“涂料”为宜。

2 涂料的作用

人类社会使用油漆已有悠久的历史。数千年前，劳动人民就利用天然资源漆，称之生漆以及从桐籽中榨取桐油，以红土等天然颜料制作漆，来装饰、保护宫殿、庙宇、庭院、车船和日用品。

现今的物质文明更处处少不了涂料的保护与装饰。大至船舶，飞机、桥梁、房屋建筑、工业设备，小至玩具、发夹等，这些多为金属材料构成的结构物，都需在其表面上涂覆一层涂料，靠形成的漆膜，把结构物的表面和空气，水分、日光以及外界腐蚀性的物质等隔开，不会发生化学性腐蚀或腐朽的变化，也避免或减轻了物体受摩擦、冲击、碰撞而引起的破坏，起了物理性的保护作用。含锌、含铝成分的涂料，当涂覆在船舶水下部位以及压载海水舱时，既能起涂层的保护作用，又能起电化学的保护作用，所以涂料对被保护的结构物主要起保护作用。

涂覆在结构物表面上的涂料，漆膜光亮，色彩艳丽，能使原来粗糙的或暗淡的表面光滑而美观，因而人们根据船舶部位的性能与要求，适宜地选择各色性能的涂料，以达到船舶防腐蚀的目的。

给船舶披上保护的、和谐的色彩外衣，使被保护的结构物可以利用涂料的颜色作出标志，便于人们对物体的识别。厂房内与船舶上的各种管道、机械设备、信号器等涂上规定色彩的涂料作为标志，可以使操作人员容易识别和提高操作的准确程度，避免发生生产事故。交通发光漆、道路划线漆、铁道号志漆，对于保证安全行车，维护交通秩序都起着重要的作用。目前利用涂料作标志的色彩，在国际上已趋于统一，逐渐标准化。

特殊结构物对涂料有特殊性能的要求，例如航行于海水中的海船的船底部位，除要求防腐蚀性能外，还要防止海生物对船底的污损，这就得涂上能起特殊作用的漆来防止海生物吸附或杀害海生物，以防止船底污损，保持航速不变，从而起到防污的特殊作用。各种电机、电器，工业常用的绝缘漆起电绝缘作用。其它的如防毒气涂料，吸收雷达波涂料，高温和照明光色互感涂料以及各种化学工业所需的耐酸耐碱的涂料，均能起着各自的特殊作用。随着科学技术的发展，各种涂料将越来越广泛地被应用。

3　涂料的分类、命名及其性能

3.1　涂料的分类

涂料是由基料、颜料、溶剂等组成的粘稠的液体。

涂料可以根据用途、施工方法、作用特点、漆膜的外观等方法进行分类。

按用途分为船舶漆、建筑漆、汽车漆等；按施工方法分为手涂漆、喷漆、烘漆、电泳漆等；按作用特点分为打底漆、防锈漆、罩面漆、防污漆。还有根据主要的基料不同，把涂料分为油基漆、树脂漆和水乳化漆。油基漆又分为油性漆和磁性漆。对于船舶来说，一般是根据船舶使用部位，将涂料划分为船底漆、水线漆、船壳漆、甲板漆，船舱漆等等。

我国综合了以上分类方法，制定了以成膜物质为基础的分类法，如果成膜物质为混合树脂，则以漆膜中起主要作用的一种树脂为基础作为分类的依据。主要成膜物质分为17类，如表2.4.1-1所示。

表2.4.1-1　**成膜物质分类**

序号	按成膜物质类别	主要成膜物质
1	油脂类	天然动植物油、清油（熟油）、合成油
2	天然树脂①	松香及其衍生物、虫胶、乳酪素、动物胶、大漆及其衍生物
3	酚醛树脂	酚醛树脂、改性酚醛树脂、二甲苯树脂
4	沥　青	天然沥青、石油沥青、煤焦沥青等
5	醇酸树脂	甘油醇酸树脂、季戊四醇醇酸树脂、其他改性醇酸树脂
6	氨基树脂	脲醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂等等
7	硝基纤维素	硝基纤维素酯、改性硝基纤维素
8	纤维酯 纤维醚	乙基纤维、苄基纤维、羟甲基纤维、醋酸纤维、醋酸丁酸纤维、其他纤维酯及醚类
9	过氯乙烯树脂	过氯乙烯树脂、改性过氯乙烯树脂
10	烯类树脂	氯乙烯共聚树脂、聚醋酸乙烯及其共聚物、聚乙烯醇缩醛树脂、聚二乙烯基乙炔树脂、含氟树脂
11	丙烯酸树脂	丙烯酸树脂、丙烯酸共聚物及其改性树脂
12	聚酯树脂	饱和聚酯树脂、不饱和聚酯树脂
13	环氧树脂	环氧树脂、改性环氧树脂

续上表

序号	按成膜物质类别	主要成膜物质
14	聚氨基甲酸酯	聚氨基甲酸酯
15	元素有机聚合物	有机硅、有机钛、有机铝等元素有机聚合物
16	橡　　胶	天然橡胶及其衍生物、合成橡胶及其衍生物
17	其　　它	未包括在以上所列的其他成膜物质和无机高分子材料、聚酰亚胺树脂等

① 天然树脂包括由天然源所产生的物质以及经过加工后处理的物质。

辅助材料，按其不同用途可分为稀释剂、防潮剂、催干剂、脱漆剂、固化剂五类。

对船舶涂料而言，是按船舶各部位所处的介质不同，而采用不同品种，不同性能的涂料。船舶涂料分类如表 2.4.1-2 所示。

表 2.4.1-2　　**船 舶 涂 料 分 类**

<table>
<tr><td rowspan="13">船舶涂料</td><td>车间底漆（预处理底漆）</td><td colspan="2">酚醛改性磷化底漆、环氧铁红无锌底漆、环氧（富锌底漆、低锌底漆）、无机硅酸锌底漆</td></tr>
<tr><td>防锈底漆</td><td colspan="2">红丹底漆、铝粉铁红底漆、磷酸锌底漆</td></tr>
<tr><td rowspan="2">水下部位（船底漆）</td><td>船底防锈漆</td><td>沥青船底防锈漆、氯化橡胶船底防锈漆、环氧沥青船底防锈漆</td></tr>
<tr><td>船底防污漆</td><td>溶介型-沥清氧化亚铜防污漆、接触型（氯化橡胶、乙烯氧化亚铜防污漆）、分散型——有机锡防污漆、SPC——有机锡高聚物防污漆</td></tr>
<tr><td rowspan="4">水上部位</td><td>水线漆</td><td>一般水线漆——酚醛、氯化橡胶等
防污水线漆——氯化橡胶乙烯等</td></tr>
<tr><td>船壳漆</td><td>醇酸船壳漆、氯化橡胶船壳漆、乙烯船壳漆、环氧船壳漆</td></tr>
<tr><td>甲板漆</td><td>酚醛醇酸甲板漆、环氧甲板漆、氯化橡胶甲板漆</td></tr>
<tr><td>上层建筑漆</td><td>氯化橡胶漆、乙烯漆、烯丙基醚漆</td></tr>
<tr><td rowspan="4">舱室涂料</td><td>压载水舱</td><td>常规沥青漆、环氧沥青厚浆涂料、羊毛脂涂料</td></tr>
<tr><td>油　舱</td><td>石油树脂、环氧涂料</td></tr>
<tr><td>货　舱</td><td>醇酸涂料、氯化橡胶涂料、环氧涂料</td></tr>
<tr><td>饮水舱</td><td>环气涂料、纯环氧涂料、生漆</td></tr>
<tr><td>其它涂料</td><td>耐热漆、耐酸漆</td><td></td></tr>
</table>

3.2　涂料的命名

3.2.1　涂料的全名＝颜色或颜料名称＋成膜物质名称＋基本名称

对涂料名称中的成膜物质名称应作适当简化，例如聚氨基甲酸酯简化称聚氨酯。如果基料中含多种成膜物质时，选一种起主导作用的成膜物质命名。如果涂料中含有松香改性酚醛树脂和松香甘油脂，当松香改性酚醛树脂占树脂总量 50%或 50%以上，则将其划入酚醛漆类；小于 50%，则将其划入天然树脂类。必要时还可选两种成膜物质命名。

对于某些有专业用途和特性的涂料，必要时在成膜物质后面加以阐明。例如：醇酸导电磁漆，白硝基外磁漆。

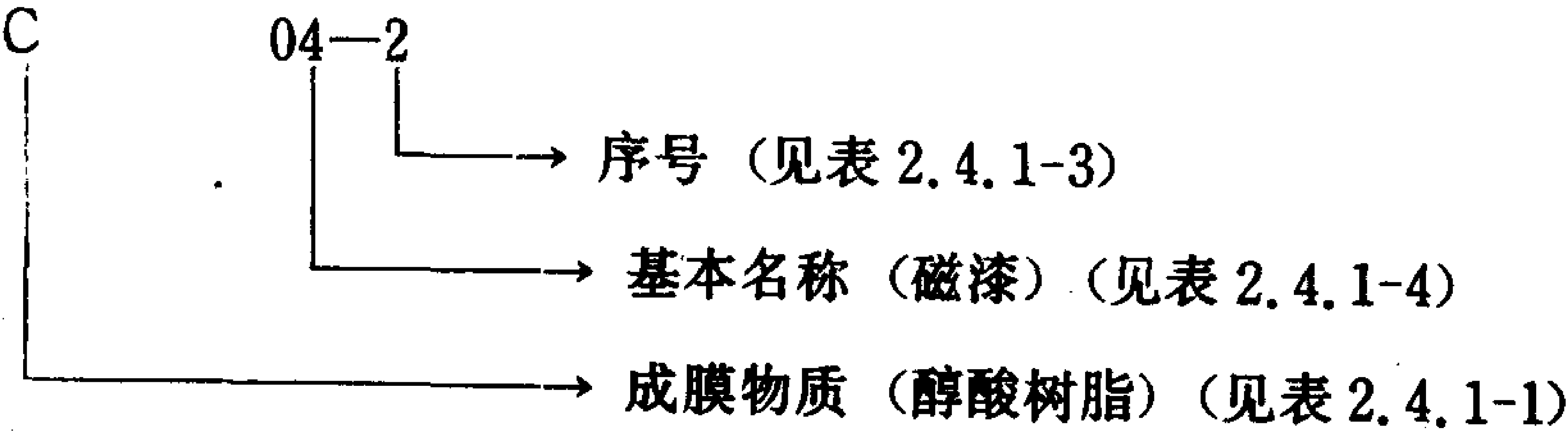
3.2.2 涂料编号原则

为了区别同一类的各种涂料，在名称前须注以型号。涂料号由一个汉语拼音字母和几个阿拉伯数字所组成。字母表示涂料的类别，即为主要成膜物质。位于型号的前面第二部分用第一、二位数表示涂料产品基本名称。这种方法目前在我国已被广泛采用。第三部分用第三、四位数表示涂料产品的序号。第二位与第三位数字之间加一短划，把基本名称代号与序号分开。

涂料类别代号：

Y—油性漆类；
T—天然树脂漆类；
F—酚醛树脂漆类；
L—沥青漆类；
C—醇酸树脂漆类；
A—氨基树脂漆类；
Q—硝基漆类；
G—过氯乙烯漆类；
X—乙烯树脂漆类；
B—丙烯酸漆类；
Z—聚脂漆类；
H—环氧树脂漆类；
S—聚氨酯漆类；
W—元素有机漆类；
J—橡胶漆类；
E—其它漆类

举例如下：



涂料的型号分三部分：第一部分是成膜物质，用汉语拼音字母表示；第二部分基本名称，用两位数表示；第三部分是序号，以表示同类品种间的组成，配比或用途的不同。这样组成的一个型号就表示一个涂料品种，而不会重复。

例如：

Y-53-31　油性红丹防锈漆
H-52-98　环氧铁红酚醛烘干防腐蚀底漆

辅助材料：

型号分两部分，第一部分为辅助材料种类，第二部分为序号。

例如：

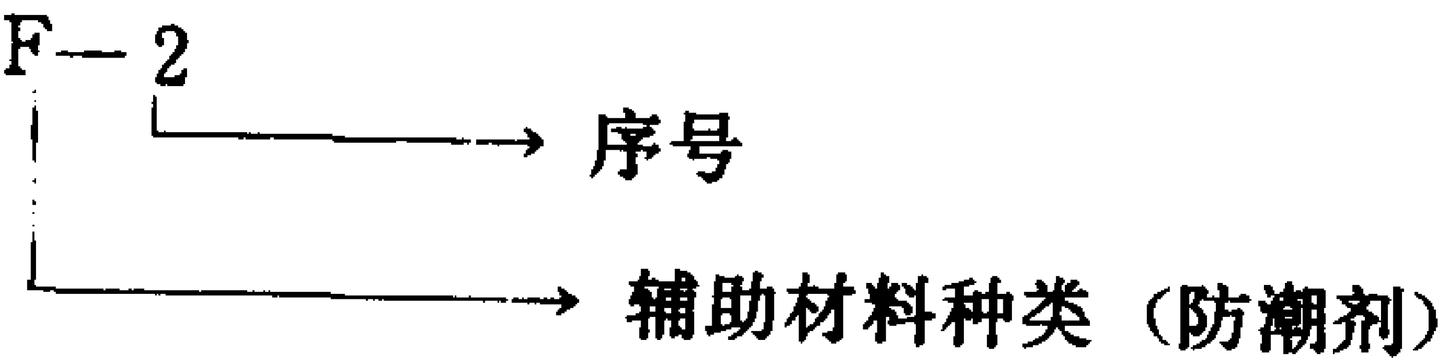


表 2.4.1-3
涂料产品序号

涂料品种		序号 自干	序号 烘干
清漆、底漆、腻子		1～29	30以上
磁漆	有光	1～49	50～59
	半光	60～69	70～79
	无光	80～89	90～99
专业用漆	清漆	1～9	10～29
	有光磁漆	30～49	50～59
	半光磁漆	60～64	65～69
	无光磁漆	70～74	75～79
	底漆	80～89	90～99

基本名称编号原则：

采用00-99两位数字表示，见表 2.4.1-4。00-09代表基础品种；10-19代表美术漆；20-29代表轻工业用漆；30-39代表绝缘漆；40-49代表船舶漆；50-59代表防腐蚀漆。

基本名称采用我国已广泛使用的名称，例如清漆、磁漆、船底漆、甲板漆等。

表 2.4.1-4 基本名称与代号

代号	基本名称	代号	基本名称	代号	基本名称	代号	基本名称
00	清油	16	锤纹漆	37	电阻漆、电位器漆	62	示温漆
01	清漆	17	皱纹漆	38	半导体漆	63	涂布漆
02	厚漆	18	裂纹漆	40	防污漆	64	可剥漆
03	调合漆	19	晶纹漆	41	水线漆	66	感光涂料
04	磁漆	20	铅笔漆	42	甲板漆、甲板防滑漆	67	隔热涂料
05	粉末涂料	22	木器漆	43	船壳漆	80	地板漆
06	底　漆	23	罐头漆	44	船底漆	81	鱼网漆
07	腻　子	30	绝缘漆（浸渍）	50	耐酸漆	82	锅炉漆
09	大　漆	31	绝缘漆（覆盖）	51	耐碱漆	83	烟囱漆
11	电泳漆	32	磁漆（绝缘）	52	防腐漆	84	黑板漆
12	乳胶漆	33	绝缘漆（粘合）	53	防锈漆	85	调色漆
13	其它水溶性漆	34	漆包线漆	54	耐油漆	86	标志漆、马路划线漆
14	透明漆	35	硅钢片漆	55	耐水漆	98	胶液
15	斑纹漆	36	电容器漆	60	耐火漆	99	其他

3.3 涂料的性能

涂料的分类是以主要成膜物质为基础，分为17类。各类涂料的性能也与此相关的表2.4.1-5叙述了各类涂料的性能及其比较。

表 2.4.1-5 各类涂料性能

涂料种类	优　点	缺　点
油脂漆	耐大气性好，适用室内外作打底罩面，价廉，涂刷性能好，渗透性好	干性较慢、膜软，机械性能差，水膨胀性大，不能打磨抛光，不耐碱
天然树脂漆	干燥比油脂漆较快，短油度的漆膜坚硬好打磨，长油度的漆膜柔韧，耐大气性较好	机械性能差，短油度的耐大气性差，长油度的漆不能打磨抛光
酚醛树脂漆	漆膜坚硬，耐水性良好，纯酚醛的耐化学腐蚀性良好，有一定的缘强度，附着力好	漆膜较脆，颜色易变深，耐大气性比醇酸漆差，易粉化，不能制白色或浅色漆
沥青漆	耐潮、耐水好，价廉，耐化学腐蚀性较好，有一定的绝缘强度，黑度好	色黑，不能制白色及浅色漆，对日光不稳定，有渗色性，自干漆，干燥不爽滑
醇酸漆	光泽较亮，耐候性优良，施工性能好，可刷、可喷、可烘，附着力较好	漆膜较软，耐水，耐碱性差，干燥较挥发性漆慢，不能打磨
氨基漆	漆膜坚硬，可打磨抛光，光泽亮，丰满度好，色浅，不易泛黄，附着力较好，有一定的耐热性耐候性好	须高温下烘烤才能固化，烘干过度，漆膜发脆
硝基漆	干燥迅速，耐油，漆膜坚韧，可打磨抛光	易燃，清漆不耐紫外光线，不超过60℃以上使用，固体份低
纤维素漆	耐大气性，保色性好，可打磨抛光，个别品种有耐热耐碱性，绝缘性较好	附着力较差，耐潮性差，价格高
过氯乙烯漆	耐候性优良，耐化学腐蚀性优良，耐水、耐油，防延燃性好	附着力较差，打磨抛光性较差，不能在70℃以上使用，固体分低
乙烯漆	有一定的柔韧性，色彩浅淡，耐化学腐蚀性较好，耐水性好	耐溶剂性差，固体分低，高温时要碳化，清漆不耐紫外光线
丙烯酸漆	漆膜色浅，保色性良好，耐候性优良，有一定的耐化学腐蚀性，耐热性较好	耐溶剂性差，固体分低
聚酯漆	固体份高，耐一定的温度，耐磨，能抛光，具有较好的绝缘性	干性不易掌握，施工方法较复杂，对金属附着力差
环氧漆	附着力强，耐碱耐溶剂，具有较好的绝缘性	爆晒易粉化，保光性差，色彩较深，漆膜外观较差

续上表

涂料种类	优　　点	缺　　点
聚氨酯漆	耐磨性强，附着力好，耐潮，耐水，耐热、耐溶剂性好，耐化学和石油腐蚀	漆膜易粉化、泛黄，对酸碱盐、醇水等物很敏感，因此施工要求高，有一定的毒性
有机硅漆	耐高温，耐候性极优，耐潮，耐水性好，具有良好的绝缘性	耐汽油性差，漆膜坚硬较脆，一般需要烘干燥，附着力较差
橡胶漆	耐化学腐蚀性强，耐水性好，耐磨	易变色，清漆不耐紫外光，耐溶剂性差，个别品种施工复杂
其它漆类	漆膜坚韧耐久，耐磨性好，耐水耐盐水性，耐油、耐溶剂性，耐热性	表面处理要求严格，施工受气候条件限制，不能在寒冷及潮湿条件下施工

表中其它漆类指无机高分子材料，聚酰亚胺树脂等。如成膜物质为硅酸盐之类的无机锌底漆等。

第 2 章　涂料的主要质量指标及其意义

涂料是由油料、树脂、颜料、溶剂及辅助材料组成。油料和树脂是主要的成膜物质，是涂料的固体成分。涂料的组成见表 2.4.2-1。

表 2.4.2-1　　　　　　　　　　**涂 料 的 组 成**

<table>
<tr><td rowspan="7">涂料的组成</td><td rowspan="2">主要成膜物质</td><td>油料</td><td>干性油、半干性油、不干性油</td></tr>
<tr><td>树脂</td><td>天然树脂、人造树脂</td></tr>
<tr><td rowspan="2">次要成膜物质</td><td>颜料</td><td>着色颜料、防锈颜料、体质颜料</td></tr>
<tr><td>增塑剂</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">辅助成膜物质</td><td>稀　料</td><td>稀释剂、溶剂、助溶剂</td></tr>
<tr><td rowspan="2">辅助材料</td><td>催干剂</td></tr>
<tr><td>其它：悬浮剂、润湿剂、乳化剂、稳定剂、催化剂等</td></tr>
</table>

涂料的质量指标与组成涂料的各组分性能密切相关。例如细度指标，是指涂料组分中颜料颗粒的粗细程度。颜料粉末的细度对于颜料的遮盖力和着色力有密切的关系。又如耐化学性，是指涂料组分中成膜物质，即漆膜抵抗酸碱盐等腐蚀作用的能力。通过以物理检验方法为主，化学检验方法为辅的检验控制其质量指标。涂料的主要质量指标及其意义分别叙述如下：

1　外观

涂料涂覆物体表面成膜后，用目测检查漆膜的色调，平整度、光泽度，有无气泡、麻点、皱褶等能否起到装饰美观的作用。

2　细度

用以测定颜料在涂料中的分散程度，以微米表示。颜料分散度愈高，细度愈细，漆膜光滑平整，保护性也好。颜料颗粒的细度对于涂料的遮盖力和着色力有密切关系。作为底漆，颜料颗粒的细度不能太细，否则将影响面漆的附着力。

检查细度采用刮板细度计。

3　密度

密度是涂料生产中或涂料使用中的一个重要质量指标。在现场生产中，可以快速核对投料量，并可根据密度测定情况调节粘度和固体含量以及决定包装的重量，并计算涂料的理论涂布量等。

4　粘度

粘度是液体分子间相互作用而产生阻碍分子间相对运动能力的量度，亦表示液体流动时所产生的内摩擦力。

粘度是控制涂料质量的重要指标，因为粘度表示涂料成膜物质，即漆料的分子量大小和

聚合的程度，这与涂料的使用寿命，漆膜的物理性能均有很大的关系。粘度能控制涂装时的漆膜厚度，以保证涂装质量。

目前我国国标测定是采用粘度表示方法，即条件粘度，在一定的温度时一定体积的液体，从规定的容器中通过一定直径的小孔流出时所需的时间。采用的仪器为涂 4 杯粘度计、旋转粘度计及锥板粘度计。一般常采用的是涂 4 杯粘度杯，以s（秒）计粘度数。以锥板粘度计测定粘度极为方便。测定的试样的绝对粘度用“Pa · s”数表示之。

5 干燥性

涂料以规定的膜厚涂覆于物体表面上，经物理性挥发，化学氧化聚合或固化作用，形成固体薄膜的过程所需的时间称为干燥性。整个干燥过程可分为表面干燥和实际干燥的两个阶段。

6 理论涂布量

根据涂料的密度，按规定的涂膜的干膜厚度(μm 计)，将涂料均匀地涂覆于物体表面上。在一切正常涂装条件下，按规定的干膜厚度计算出的单位面积所需的涂料量，即 m^2/L 或 mm^2/kg，称为涂料的理论涂布量。它与实际涂装中涂料消耗量是不相同的，因为它并不包括飞溅和某种因素所造成漆的损失。

7 附着力

涂覆于物体表面上的涂料形成了干的薄膜。漆膜与物体表面的粘结力或漆膜层间的粘结力称为附着力，附着力是考核漆膜性能的重要质量指标之一。

测定漆膜的附着力有画圈法，采用的仪器为画圈法附着力测定仪。我国国标是采用画圈法，共分为 7 级，以 1 级的附着力最好，依次类推。划格法采用 ISO 标准刀具，在漆膜表面上纵横划格。ISO 划格法分为 0 ～ 6 级，以 0 级为最好，此法便于现场检验。目前还用拉开法来测定漆膜的附着力，此法主要用于检验漆膜层之间的附着力。

8 硬度

硬度是表示漆膜机械强度的重要性能之一。是漆膜表面对作用其上的另一个硬度较大的物体所表现的阻力。漆膜的硬度与干性很有关系，一般漆膜干得越彻底，硬度就越高。

我国采用摆杆硬度计来测定漆膜的硬度。

9 冲击

是测试漆膜承受高速负荷作用下的变形程度的一项指标，同时也可以观察被测漆膜的弹性和对底板的附着力。

测定是以 1000 g 重锤的质量与落在涂漆样板上而不引起漆膜破坏的最高高度的乘积，以 kg · cm 表示。

10 柔韧性

柔韧性又称弹性，表示漆膜受力并撤除作用力后，恢复其原形的能力。测定时，将涂有漆膜的金属板在不同直径的轴棒上弯曲，以弯曲后不引起漆膜破坏的最小轴棒的直径表示。

其轴棒直径分别为 1、3、5、10、15、20 mm。

11 耐水性

漆膜受到水的作用而不发生变化的能力，称为耐水性。根据涂料的品种，按标准制 规定的膜厚可在盐水或人造海水溶液中浸泡规定的时间后，观察漆膜有无开裂、起泡、剥落、生锈等现象。

12 耐候性

耐候性代表了漆膜的各种综合的技术性能，因此最有实用价值。它是指油漆受日光雨露及气候的变化的影响，会引起失光，开裂、褪色、粉化、起泡和锈蚀等各种破坏现象。因此应对漆膜进行耐候性考核。

检查的方法是：将按规定制成的漆膜，放置在规完的固定曝晒架上，按规定时间检查薄膜失光、变色、粉化、裂纹、起泡、生锈、长霉、斑点、脱落、沾污等现象，并进行 0 ～ 4 级的 5 级评定，以 0 级为最好， 4 级最差。

13 耐化学性

耐化学性指漆膜耐腐蚀的性能，即漆膜对酸、碱、盐及溶剂的耐腐蚀作用的能力。

14 耐油性

耐油性指漆膜耐工业用的汽油、煤油等性能，漆膜浸在油中而对油的质量不影响。

15 耐电位性

耐电位性是指漆膜耐阴极保护的作用。当物体采用涂层和阴极保护法（指浸海水里的物体采用牺牲阳极法或外加电流法）的联合保护时，这时涂层的漆膜必须具有耐电位性能，否则在阴极保护电流的作用下，会发生漆膜起泡、脱落现象。

第3章 船舶涂装

1 钢材的预处理

钢材或钢铁在涂装前，对其锈蚀的表面需进行除锈处理，这样，才能使涂层起到应有的保护效果。不然，锈蚀的表面即使涂上最好的涂料，也只能得到甚微的保护效果。因此，钢材及其结构件的表面处理的质量直接影响涂层质量和寿命。表2.4.3-1反映了影响涂层质量和寿命的有关因素。

表2.4.3-1 影响涂层质量和寿命的因素

主要因素	所占百分比（%）
涂料品种及涂层总厚度	45
表面处理质量	40
其它（环境因素、涂装技术）	15

目前，钢材预处理采用常规的手工除锈。这种除锈方式速度慢，劳动力耗费大，作业环境污染严重。自70年代以来，在造船、汽车行业开始采用了钢材原材料除锈，采用了钢材预处理流水线作业。

由于采用了钢材预处理自动喷涂流水线作业，仅仅几分钟的时间，用自动抛丸的方法，将钢材表面的氧化皮除净，呈现出金属的本色，即深灰色。经除锈后，钢材表面的清洁度达到瑞典标准 SISO 55900 Sa $2\frac{1}{2}$级。相当我国CB 3092-81《船体除锈标准》中的bl级。当钢材或钢材构件，经过手工的、机械的、自动流水线抛丸等的除锈方式，除锈处理后立即涂覆15～25μm厚的一层薄的涂层，这一涂层的漆称为车间底漆。防锈期一般在3～9个月。

总之，钢材或钢构件经过除锈后，再涂覆一层薄薄的车间底漆。在一定的期限内，该底漆保护钢材或钢构件不生锈，称作钢材的预处理。

2 常用的船舶涂料

常用的船舶涂料，可分为常规涂料和高性能涂料。

常规涂料有油脂漆、天然树脂漆、酚醛漆、沥青漆、醇酸树脂漆。除沥青漆以外，所有的常规涂料均含有可皂化的漆料，因此耐化学性差。

高性能涂料有环氧树脂、聚氨酯树脂、氯化橡胶和乙烯共聚树脂等为漆料的涂料。高性能涂料耐候性好，耐化学性好，其漆料不皂化，故能用于船舶的水下部位，并能适应阴极保护的作用。

根据目前我国船舶漆品种现况，按船舶各部位常用的配套涂料列表2.4.3-2。其中海鸥牌船舶涂料为我国引进丹麦老人牌涂料（Hemple's Reference），由蛇口海虹油漆厂生产。KL-IP 船舶涂料为引进英国红叶牌涂料，（Intermation Paint Reference）由上海开林造漆厂生产，引进的国外涂料产品均已投入市场，应用也较为广泛。几种涂料产品的对照见表2.4.3-3。

表 2.4.3-2　　**船舶各部位的配套涂料**

船舶部位	合适的配套涂料(光明牌)	道数	干膜厚度(μm)	备　注	海鸥涂料	道数	干膜厚度(μm)	开林-ip 涂料	道数	干膜厚度(μm)
	一、常规配套涂料				一、常规配套涂料					
	L 44-81 铝粉沥青船底漆	2	70		海虹铝粉沥青底漆 1000	2	80			
	L 44-82 铁红沥青船底漆	2	70		海虹沥青厚浆漆 1022	1	100			
	836 (或 837) 沥青防污漆	2	70		海虹防污漆 7134	2	80			
船	二、高性能配套涂料			1. 超大型油船的	二、高性能配套涂料			高性能配套涂料		
	1. 环氧沥青类			平坦船底不涂防	1. 环氧沥青类			1. 环氧沥青类		
	846-1 环氧沥青厚浆型防锈底漆	1	100	污染	Seagulldur 1513	2	250	Intertuf JXA 005/JXA 010	1	125
	846-5 环氧沥青厚浆型防锈底漆	1	100	2. 高性能配套涂	Seagullanyl 1628	1	80	Intertuf JXA 006/JXA 010	1	125
	616 氯化橡胶铁红厚浆型防锈漆	1	75	料适于与阴极保	Seagull's 7655	2	100	Intertuf JVA 002 或 003	1	75
	838 或 839 长效防污漆	2	100	护配合使用				Interspeed BJA 600	2	100
底	2. 氯化橡胶类			3. 当采用外加电	2. 氯化橡胶类			2. 氯化橡胶类		
	615 氯化橡胶铝粉防锈漆	2	110	流阴极保护时,	Seagulltex 1630	1	40	Interchlor LPL 274	1	75
	616 氯化橡胶厚浆型防锈漆	1	75	阴极周围应特别	Seagulltex 4633	2	150	Inter chlor LPL 786	1	75
	838 或 839 长效防污漆	2	100	加以保护	Seagull's 7655	2	100	Inter chlor LPL 274	1	75
	664 氯化橡胶沥青防锈漆	3	210					Inter speed BJA 600	2	100
	838 或 839 长效防污漆	2	100							
	一、常规配套涂料			1. 如需浅色，不	一、常规配套涂料			一、常规配套涂料		
	1. 铝粉铁红防锈漆(底漆)	2	70	应使用含沥青的	Seagullin 1205	2	80	Interprime 039	1	40
								Interprime 038	1	40
	F 41-31 各色酚醛水线漆	2	100	底漆。	Seagull 5239 或 5118	2	60	Interlac cB　水线漆	2	8
	2. 铝粉铁红防锈漆(底漆)	2	70	2. 桐油酚醛漆不	二、高性能配套涂料			二、高性能配套涂料		
水	F 41-32 各色酚醛水线漆	2	100	与阴极保护配合	Seagulltex 4633	2—3	150～225	Inter chlor LPL 274	1	75
	二、高性能配套涂料			使用。	Seagulltex 5624	1～2	60～120	Interchlor LPL 786	1	75
								Interchlor LPL274	1	75
线	615 氯化橡胶铝粉防锈漆	2	110		三、如果需要防藻，面层可涂防污漆			Interchlor CF 面漆	1	40
	615 氯化橡胶厚浆型防锈漆	1	75		底，常按船底部位配套			三、如果需要防藻，面层可涂防污		
	各色氯化橡胶水线漆	2	100					漆，底层与船底相同		
	三、如果需要防藻，水线面漆应具有杀藻能力									
	F 41-34 酚醛防污水线漆或 H 41-508 环氧水线防污漆									

续上表

船舶部位	合适的配套涂料(光明牌)	道数	干膜厚度(μm)	备　注	海鸥涂料	道数	干膜厚度(μm)	开林-ip 涂料	道数	干膜厚度(μm)
船壳与外甲板	一、常规配套涂料			为了方便清洗,	一、常规配套涂料			一、常规配套涂料		
	1. 底漆：铝粉铁红防锈漆	2	80	厚浆系统配套涂	Seagullin 1205	2	80	Interprime 039	1	40
	面漆：各色酚醛船壳漆	2	60	料中的面漆不应	Seagullin 5104	2	80	Interprime 038	1	40
	或：各色纯酚醛船壳漆	2	60	是厚浆型的				Inter Lac CL 面漆	2	80
	或各色醇酸船壳漆	2	60		二、高性能配套涂料			二、高性能配套涂料		
	二、高性能配套涂料				1. Seagulltex 4633	2～3	150～225	Interchlor LPL 274	1	75
	1. 氯化橡胶铝粉防锈漆	2	80		Seagulltex 5624	1～2	60～120	Interchlor LPL 786	1	75
	各色氯化橡胶船壳漆	3	120					Interchlor LPL 274	1	75
	2. 铁红环氧酯底漆	2	80					Inter chlor LF 面漆	1	40
	各色过氯乙烯船壳漆	3	120							
	3. 氯化橡胶铝粉防锈漆	2	80							
	烯丙基醚船壳漆	3	120							
露天甲板	一、常规涂料配套			1. 装载化学品的	一、常规配套涂料			一、常规配套涂料		
	红丹酚醛防锈漆	2	80	油船，只能采用	Seagullin 1205	2	80	Interprime 039	1	40
	或铁红环氧酯防锈漆			环氧或聚氨酯树脂漆	Seagullin 5239			Interprime 0.38	1	40
	各色醇酸甲板漆或甲板防滑漆	2	60		或 5324			Interlac CL 甲板漆	2	80
	二、高性能配套涂料			2. 装载溶剂的货	二、高性能配套涂料			二、高性能配套涂料		
	1. 625 氯化橡胶减色防锈漆	2	80	轮应采用环氧或	1. Seagulltex 4633	2	120	1. Interchlor LPL 274	1	75
	氯化橡胶厚浆漆	1	75	聚氨酯树脂漆或	Seagulltex 5624	2	60	Interchlor LPL 786	1	75
	各色氯化橡胶甲板漆	2	75	硅酸锌涂料	或 5625 防滑漆			Interchlor LF 面漆	2	80
	2. 881 环氧树脂甲板	3	200		2. Seagull's 1570	1	65	2. Inter Zinc QHA028/QHA 027	1	65
	3. 硅酸锌涂料		75～120		Seagulltex 1667	1	50			
	4. 各色聚氨酯甲板防滑漆	4	200		Seagulltex 5624 或 5625	1～2	40～80	Interchlor LF 面漆	2	80

续上表

船舶部位	合适的配套涂料(光明牌)	道数	干膜厚度(μm)	备　注	海鸥涂料	道数	干膜厚度(μm)	开林-ip 涂料	道数	干膜厚度(μm)
油水舱	1. 846-1 环氧沥青厚浆型防锈漆	1	125		1. Seagulldur 1513	2	250	Intertuf JXA 006/JXA 010	1	125
	846-2 环氧沥青厚浆型防锈漆	1	125		2. Seagulldur 1503 冬用	2	250	Intertuf JXA 007/JXA 010	1	125
	2. 844 无溶剂环氧油水舱底漆	2	125							
	844 无溶剂环氧油水舱面漆	2	125							
	3. 53-31 铝粉聚氨酯环氧防锈漆	2	80							
油水舱	铁红聚氨酯环氧油舱漆	2	80							
	S 01-14 聚氨酯环氧清漆	2	60							
淡水舱与饮水舱	1. 849 漆酚漆	3	150		Seagulldur 4520	3	300	Intergard THA 200/THA 201	1	125
	2. 环氧酮亚胺饮水舱漆	3	150					Intergard THA 704/THA 201	1	125
	3. K型饮水容器内壁涂料	4	200							
	4. H型饮水容器内壁涂料	4	200							
压载水舱	1. 846-1 环氧沥青厚浆防锈漆	1	125	1. 货物压载水舱应采用环氧树脂漆 2. 用流水膜保护压载水舱需经常重涂	1. Seagulldur 1513	2	250	Intertuf JXA 006/JXA 010	1	125
	846-2 环氧沥青厚浆防锈漆	1	125		2. Seagulldur 1503 冬用	2	250	Intertuf JXA 007/JXA 010	1	125
	2. 环氧沥青漆	4	250							
	3. 沥青漆		300							
	4. 流体膜涂料		2～3 mm							
舱室	铝粉铁红防锈漆	2	80		Seagullin 1205	2	80	Interprime 039	1	40
					Seagullin 4241	1	40	Interprime 038	1	40
	各色醇酸磁漆	2	60		Seagullin 5214	1	30	Interlac CF 面漆	2	80

表 2.4.3-3

我国现有的光明牌船舶涂料品种与几个国家船舶涂料品种的对照

涂料类型 Type of system	光明牌 K. M. Paint Reference No.	英国红叶牌 International Paint Reference No.	日本中国牌 Chugoku Reference No.	丹麦老人牌 Hemple's Reference No.
Shop Primer 保养底漆	702 Shop Primer 环氧富锌底漆	Interplate NLA 069/NLA070 Epoxy Zinc	Epicon Zinc Rich Primer A	Hempadur Zinc Primer 1535
Chlorinated Rubber 氯化橡胶类	615 Chlorinated Rubber Aluminum Anticorrosive Primer 氯化橡胶铝粉防锈漆	Interchlor LPA 012 HB Primer Aluminum	Ravax A. C. HB	Hempatex Aluminum 1630
	616 Chlorinated Rubber Red Oxide Anticorrosive Primer 氯化橡胶厚浆型防锈漆	Interchlor LPL 274 HB Primer Red	Ravax Primer HB	Hempatex Primer 1631
	Chlorinated Rubber Finish 氯化橡胶各色面漆	Interchlor LF Series Finish	Ravax Bootopping Ravax Finish	Hempatex 5624 Hempatex 5636
Epoxy 环氧类	846 Coal Tar Anticorrosive Primer HB 环氧沥青厚浆型防锈漆	Intertuf JJA 024/JJA 025 Epoxy Black Intertuf JJA 023/JJA 025 Epoxy Aluminum	Biscon No. 1000	Hempadur 1513
	834 Epoxy Tank primer 835 Epoxy Tank Finish 环氧沥青油舱漆	Intertuf JXA 005/JXA 010 Epoxy Aluminum Intertuf JXA 007/JXA 010 Epoxy Brown	Biscon No. 1000	Hempadur 1513
	844 Solvent Free Epoxy Tank Coating 无溶剂环氧油水舱涂料	Intergard EPA 310/EPA 711 Primer Aluminum	Epicon T 300 Primer Epicon T 300 Finish	Hempadur 1540

续上表

涂料类型 Type of system	光 明 牌 K. M. Paint Reference No.	英国红叶牌 International Paint Reference No.	日本中国牌 Chugoku Reference No.	丹麦老人牌 Hemple's Reference No.
Antifouling 防 污 漆	836 Brown Antifouling Paint 棕色防污漆	Interclene BCA 300 Premium	Chugoku AF Tropical	Hempel's AF 7133
	837 Antifouling Paint 沥青防污漆	Interclene BCA 500 Extra-red	Chugoku AF ST	Hempel's AF 7134
	838 Vinyl Antifouling Paint 乙烯防污漆 839 Long Life Antifouling Paint HB 长效厚浆型防污漆	Interspeed BJA 600 Super	Chugoku Vinyl AF	Hempanyl AF 7618
Convertional Products 常 规 产 品	830-1 Aluminum Primer 铝粉打底漆	Intertuf JAA 021 Silver	Silvax QD	Hempel's Platin Primer 1000
	831 Brown Anticorrosive Paint 黑棕船底防锈漆	Intertuf JAA 001 Sealer	Chugoku AC	Hempel's AC 1004
	826 Red Oxide Boottopping Paint 紫红水线漆	Interlac CBL 274 Boottop Red	Chugoku Boottopping	Hempel's Boottop 5118 (5063)
	829-1 Brilliant Green Boottopping Paint 艳录色水线漆	Interlac CBL 549 Boottop Signal Green	Chugoku Boottopping	Hempel's Boottop 5118 (4064)
	871 Red Oxide Leck Paint 紫红甲板漆	Interlac CJL 274 Deck Red	Chugoku Deck Paint Q. D.	Hempalin Deck Paint 5324(5063)
	873 Green Deck Paint 绿色甲板漆	Interlac CJK 549 Deck Signal Green	Chugoku Deck Pains Q. D.	Hempalin Deck Paint 5324(4064)
	712 Red Lead Primer 红丹防锈漆	Interprime CPA 124 EE Orange	Chugoku Red Lead Primer Q. D.	Hempalin Red Lead Q. D. 1237

续上表

涂料类型 Type of system	光明牌 K. M. Paint Reference No.	英国红叶牌 International Paint Reference No.	日本中国牌 Chugoku Reference No.	丹麦老人牌 Hemple's Reference No.
Convertional Products 常规产品	725 Zinc Chromate Primer 锌黄防锈漆	Interprime CPA 038 Yellow	Chromide No. 500	Hempalin Primer 1205
	867 White Topside Paint 白船壳漆	Interlac CLB 000 Finish White	Evamarine Exterior	Hempalin Gloss Enamel 5214(1000)
	870 Marine Grey Topside/ Paint 海灰船壳漆	Interlac CLF 684 Finish Surf Grey	Evamarine Exterior	Hempalin Gloss Enamel 5214(1217)
	886-4 Cream Mast Paint 淡奶油桅杆漆	Interlac CLB 125 Finish Sand	Evamarine Exterinr	Hempalin Gloss Enamel Enamel 5214(2041)
	906 Light Green Cabin Enamel 淡绿船舱漆	Interlac CLF 445 Finish Estuary Green	Evamarine Interior	Hempalin Gloss Enamel 5214(4098)
	806 Red Signal Paint 红色标志漆	Interlac CLB 295 Finish Ensign Red	Evamarine Interior	Hempalin Enamel 5214(5080)
	753 Engine Enamel 银色轮机漆	Interlac HTA 002 Aluminum	Heat and Oil Resistant ELVA Silver	Hempel's Silvium 5157
	751 Aluminum Hold Paint 银色货舱漆	Interbond CAA 007 Aluminum	Chugoku Hold Silver	Hempalin Aluminum Hold Coating 5157-1
	887 Red Oxide Hold Paint 紫红货舱漆	Interlac CAA 001 Finish Red	Chugoku Hold Paint	
	421 Bituminous Solution 沥青液	Intertuf JBA 003 Black	Bitumen Solution	Hempel's Bunkernit 1007
	100 Marine Spar Varnish 船用凡立水	Interlac HVA 002 Varnish	Spar Varnish	Hempalin Marine Varnish

3 涂装的方式

3.1 船舶涂料涂装方式

常见的涂装方式有刷涂、滚涂、压缩空气喷涂、高压无气喷涂等。见表 2.4.3-4

表 2.4.3-4 几种涂装方式表

涂装方式		原理	特征	用途
刷涂		在刷子上沾上涂料进行涂刷	不要特别设备，涂覆方式极为简单，但涂漆效率低，容易形成刷痕、斑点。	各行业均可使用
辊涂		用海棉等材料制成的圆筒沾上涂料进行滚动涂刷。	效率低，漆膜表面不光滑，曲面处不能涂复	使用于建筑物的外壁、内壁上
喷涂	压缩空气喷漆	用压缩空气使涂料雾化，同时喷到被涂表面而形成漆膜	使用范围广，操作简单，但有雾的飞散和涂料损失多的缺点	广泛使用，各行业中均可使用。
	无气喷涂	用泵加 10.1325 MPa左右的液压，从细孔喷射雾化，跟压缩空气喷涂一样形成漆膜	不使用压缩空气，雾的飞散较少，效率高，但在漆膜表面及操作方面不如压缩空气喷涂的好	适用于大量涂漆，各行业平均能使用，但小件及装饰为重点的作业使用有困难

3.2 船舶涂料涂装工艺

1）船舶涂料涂装工艺分 5 个阶段：车间底漆涂装 钢板和型材经过表面预处理后，喷上薄薄一层车间底漆。进行下料、切割、加工、焊接装配成分段。

2）分段涂装 船体分段有平面分段和立体分段之分。把经过预处理并涂有车间底漆的分段表面，采用喷射磨料和动力工具打磨两种方法，进行二次除锈，再进行分段涂装。当进行分段涂装时，最好在涂装房进行。总之，使分段放置的场所，放置的方法和方向等适合于涂装作业。

3）船台涂装 是指分段在船台上合拢以后直至船舶下水前建造过程中的涂装作业。船体的各部位均已复盖着涂层，有些部位是车间底漆，有些部位已有底层防锈漆。由于分段的运输、吊装、焊接以及合拢后安装各种机器设备、舣装件等，使涂层受到损坏。在分段涂装时留下焊接部位没有涂装，需进行二次除锈，即使涂层完好的部位也需进行表面清洗后才能涂装。船台涂装重点是船壳外板的涂装。

4）整体涂装 是指船舶下水后，停靠在舣装码头上，继续进行舣装件和各类机械设备、电气设备的安装和调试工作，直至交船。整体涂装是对船舶的各个部位全面进行涂装，并在交船前完成全部涂装工程，所以整体涂装亦称为最终涂装。

5）舣装件涂装 指大型的舣装件，如桅杆、吊杆、烟囱等，它们是作为船体一部分的。大部分舣装件，如锚机、绞缆机、起货机、吊艇架、舷梯、食物吊等，一般是依靠底座固定在船的各部位上。此外，还有各种箱柜、管系、阀件等等。

船舶各部在各个工艺阶段的涂装顺序，与船舶类型、船厂管理状况和习惯作法、选用涂料的种类、建造的周期、表面处理和涂装的设备能力等多种因素有关，各厂不尽相同。表 2.4.3-5 为主船体在涂装各工艺阶段的涂装顺序。

表 2.4.3-5　　　　　　　　　　主船体涂装各工艺阶段的涂装顺序

涂装阶段 涂装内容 涂装			分段	船台	下水后 至试航前	交货前	备　　注
外板	船底（包括海水阀箱和舭龙骨）		AC C/R×3 AFG/R×1			A·FC/R×1 （完工）	包括底部分段,底边水舱分段,首尾主体分段
	水线			AC C/R×2 BT C/R/1		BTC/R×1 （完工）	
	干舷	一般		AC C/R×2 TS C/R×1		TSC/R×1 （完工）	
		3～5 分段	AC C/R×2 TS C/R×1			TSC/R×1 （完工）	
液舱	首尖舱、尾尖舱、顶边水舱、双层底压载水舱、固定冷却水舱、污水舱、污油舱		TE×2		修补结束（完工）←…→		凡有←…→者表示工作可跨两个阶段
	淡水舱、饮水舱、供应水舱、滑油循环舱				P·E×2（完工）←…→		
	各燃油舱、柴油舱、滑油舱		QT×1		修补结束（完工）←…→		
货舱	No.3 货舱	上半部			修补结束（完工）←…→		
		下半部		T.E×2		←…→ 修补结束（完工）	
	No.1,2 4,5 货舱	盖、顶	R.P×2		A.P×1（完工）←…→		
		底		R.P×2	D.P×1（完工）←…→		
	污水井			T·E×2(完工)…→	←…		
	货舱盖	内表面	T.E×R		修补结束（完工）←…→		包括舱口围板内侧
		外表面	R.P C/R×1		RP C/R×1 FP C/R×2		包括舱口围板外侧和支撑
甲板 机舱 上层 建筑	… … …						

4　涂装的质量检验

涂装前表面处理，二次除锈质量，涂层配套及涂层的干膜厚度，漆膜的外观等技术规定，所进行的检验，称为涂装的质量检验。

4.1 表面处理的质量检验

当对表面进行一次或二次表面处理后，达到所规定的除锈等级。表面处理等级我国船体除锈标准CB*3092—81与国外标准对应关系可见表 2.4.3-6。

表 2.4.3-6　CB*3092-81与若干国外除锈标准的对应关系表

项目	我国船体除锈标准 CB*3092-81	瑞典除锈标准 STSO 55900-67	美国钢结构涂装委员会除锈标准 SSPC-VISL	英国除锈标准 BS 4232-1967	日本造船研究协会除锈标准 JSRA-SPSS
一次除锈质量等级	/	Sa3	SP5出白级	1	sh3,sd3
	b_1	Sa2.5	SP10接近出白级	2	sh2,sd2
	b_2	Sa2	SP6工业级	3	Sh1,Sd1
	b_3	Sa1	SP7清扫级		
	t_2	St3	SP_3机动工具除锈		
	t_3	St2	SP_2手工工具除锈		
钢材原始除蚀程度	A	A			
	B	B			
	C	C			
	—	D			

对表面清理的质量检验见表 2.4.3-7。

表 2.4.3-7　**表面清理的推荐方法及质量检验**

表面状态	清理方法	清理质量检验		
		无机锌涂料	环氧树脂涂料	一般涂料包括油性树脂涂料，氯化橡胶涂料等。
水份	以布、回丝、拖把抹平或压缩空气吹干	肉眼看不见		
油溶性杂质，如油脂，探伤液导	用溶剂或清洗剂擦除	肉眼看不见	肉眼可见轻微痕迹	
粉笔、石笔记号	如为无机锌、环氧树脂，则用湿布或回丝抹去；如为一般涂料，则可用干布或回丝抹去	肉眼看不见	肉眼可见痕迹	
水溶性杂质，如盐类、肥皂水等	先用淡水冲洗，然后再用第1项方法擦干	肉眼看不见		
白锈、锌尘	用喷丸清扫或手工、动力工具清除	肉眼可见轻微痕迹		
残留的焊接飞溅溶渣和烧损涂层	用手工或动力工具清除	肉眼可见痕迹		
焊接或气割烟尘	用布、回丝或拖把擦去，如系碱性焊条焊接，产生强碱性吸附层，则用动力工具清除	用手擦不掉		
油漆记号或由印号料	对于不属涂料配套范围内的记号，用动力工具清除	肉眼可见痕迹或不必擦掉		
损坏或松脱涂层	用手工或动力工具清除	肉眼看不见		
泥污，尘埃沙粒等其他污物	用布、回丝、扫帚或压缩空气等去掉，不易除净的污斑或残留物，用动力工具或真空吸尘机等清除	肉眼可见痕迹		

4.2 涂层的质量检验

4.2.1 底漆质量检验

不产生曳尾、缩孔缩边，起泡，喷丝、浮色流挂、龟裂、回粘等现象，否则要返工，以保证涂层的质量。

4.2.2 面漆的质量检验

除上述底漆质量现外，不能产生渗色，咬底皱皮，片落，剥落、脱皮的现象。

对涂层干膜状态的质量检验，即干膜状态出现的弊病及其处理方法。见表 2.4.3-8。

表 2.4.3-8　　　　干膜状态的弊病及其处理方法

弊　病	现　　象	原　　因	预防与处理方法	
白化	涂层表面发白模糊	温度高的时候，涂装被涂物温度过低，致使表面潮湿而引起涂层发白	加强温度、湿度控制或实行露点管理	轻微的白化用稀释剂涂刷严重的则磨去重涂
		涂装后，夜间气温下降，表面凝结水份或涂装后遇到水份等	避免在傍晚以后涂装干燥较慢的涂料	
		涂料溶剂迅速挥发，使涂面产生冷凝水	调整稀释剂，使挥发较为缓慢	
	涂层表面发生如针刺过一样的小孔	喷涂时存在水分或油分	除去水份和油份	对轻微的小针孔现象用砂纸打磨表面再薄薄涂一层；重者要重涂
		被涂表面温度过高	在适当的温度条件下涂装	
		一次涂装太厚	按推荐膜厚涂装	
细裂 龟裂	涂层表面呈现裂纹细小者称细裂，较大者深者称为龟裂	底层涂料未干即涂面层涂料或底层涂装过厚	待底层涂料干燥后再涂面层，按推荐膜厚涂装	除去裂纹部份重新涂装
		涂层配套不当，如底层涂料较软，面层涂料较硬时	注意涂层配套的正确性	
		温度急剧下降时	预见温度将骤冷时应采取措施	
回粘	干燥的涂膜重新发粘	被涂表面有酸碱等化学物质附着	除净表面，对未干透的混凝土表面、用盐酸处理过的焊锡表面应避免涂装	轻度回粘则再放置一段时间严重者或长期放置仍不干者应除去重涂
		低温自然干燥后，在强烈的阳光照射下	避免烈日照射	
		添加不挥发的稀释剂或质量不当的展色剂、干燥剂	不添加内容不明或明知不当的物质	

续上表

弊病	现象	原因	预防与处理方法	
片落 剥落 脱皮	涂膜从底材表面脱落6 mm以下小片脱落，称为片落，稍大于6 mm的脱落称剥落，大片脱落称脱皮	被涂表面附有油脂，水分、锈、尘埃等杂物	达到表面处理质量要求	剥落部分打磨后，重新涂装，脱皮严重者，则全面返工
		底面漆配套不当	涂层配套系统正确性	
		面层涂料时，超过规定的涂装间隔时间	按规定的涂装间隔时间涂装	
		水下区域涂料耐电位性差或阴极保护电流密度过大	涂层的耐电位性，合理的设计阴极保护电流	
		被涂表面过于光滑	涂层表面粗糙度	
泛黄	白色、浅色涂膜变黄	用桐油，亚麻油等制成的油料或添加干燥剂过多	改进涂料配方	重涂
粉化	涂膜分解颜料成为细微粉末渐渐脱落	涂料展色剂，耐候性差，或采用耐候性差的体质颜料过多	改进涂料配方	除去粉化表面，重涂
黑度	船底防污漆在水中变黑的现象	含氧化亚铜的防污漆料在含硫化氢较多的水域里浸渍过久	改变防污漆的毒料及防止水域的污染	

4.3 涂层膜厚的质量检验

涂层厚薄要均匀，要达到船舶各部位规定的漆膜厚度。

4.3.1 膜厚分布

规定的膜厚一般应符合涂料厂商推荐的膜厚值，也可以是船厂与船东协商而定的，为涂料厂商所能接受的合理的干膜厚度值。对于膜厚分布状态的要求，各国要求不尽相同。较高的膜厚要求所谓两个90%，即要求90%以上的检测点所测得的膜厚值，必须达到或超过规定膜厚值，余下的10%检测点所测得的膜厚值，必须不低于规定膜厚值的90%。也可用两个80%或较低的要求用两个70%。如图2.4.3-1所示。

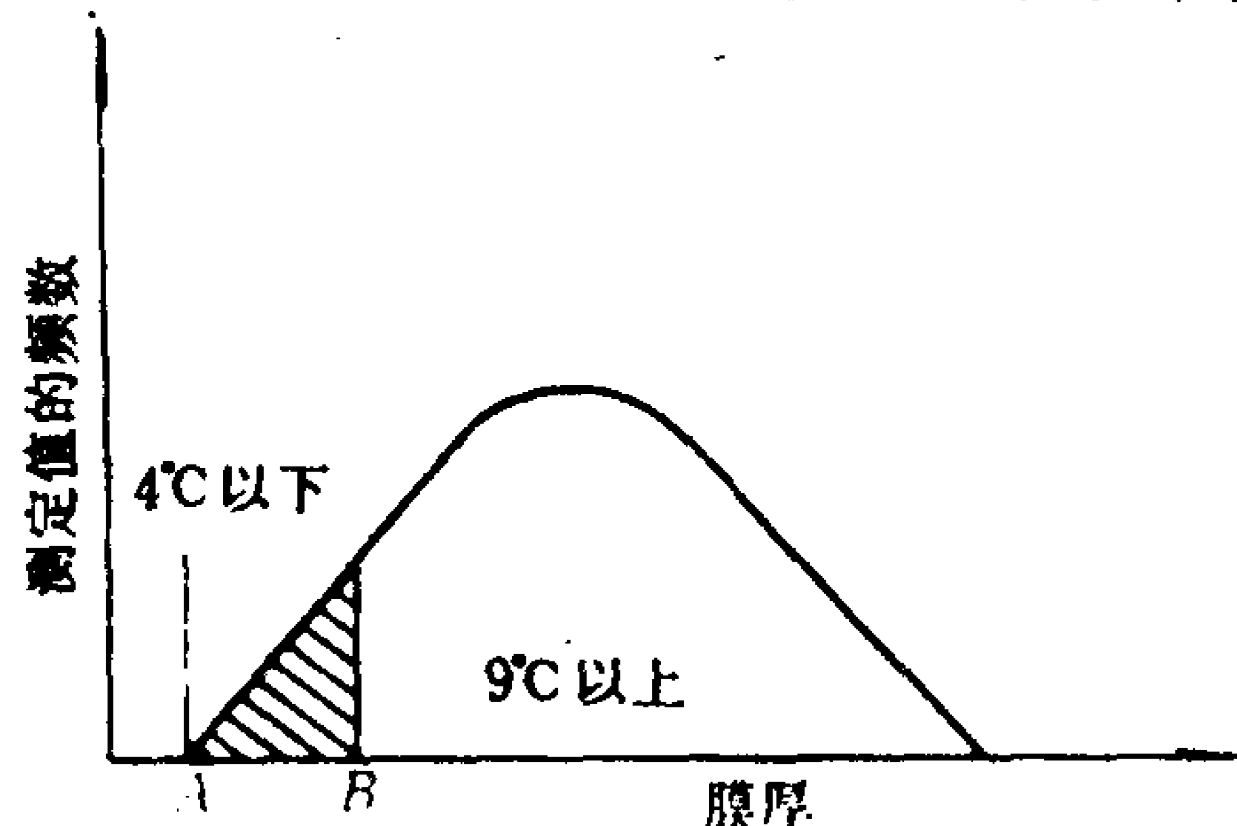


图2.4.3-1 膜厚分布图

A-规定的膜厚；*B*-规定膜厚的90%

管径≤32 mm的管路

当达不到规定的膜厚要求，应进行补涂。为了不增加涂料的用量及工程进度，根据理论涂布量，掌握住实际涂布量，控制湿膜厚度来达到规定的干膜厚度是十分重要的。

4.3.2 膜厚数据整理

根据检测的膜厚数据，必须进行整理，以反映膜厚是否达到要求。

1)车间底漆的膜厚数据整理

车间底漆的膜厚数据整理方法比较简单，只需求出正反面的膜厚平均值和合格率。当正反面平均膜厚均达到规定值，合格率大于80%，即表示膜厚分布符合要求。

2）船体涂层膜厚数据的整理

船体涂层膜厚数据的整理是较为细致的，步骤如下：

（1）将下表所有膜厚检测点的膜厚数值按大小分成若干组，分组的多少与检测点数的关系见表 2.4.3-9。

表 2.4.3-9

检测点数	20～50	50～100	100～250	250 以上
分组数	5～7	6～10	7～12	10～12

（2）分组的组距大小应取略大于测得的最高膜厚和最低膜厚之差与组数的商值的整数。如检测点数为 233，最大膜厚为 393 μm，最小膜厚 210 μm，以取 10 组为例，则组距为：

$$\frac{393-210}{10}=18.3\approx20 \text{ 即以 } 20\ \mu\text{m为宜}$$

最高膜厚和最低膜厚不应与组距边界重合，最好取在组中值。分组以后，将各组的点数与总的检测点一一相比，算出各组的频率。然后算出平均膜厚 $\bar{T}$，$\bar{T}$的计算公式为：

$$\bar{T}=\frac{T_1+T_2+\cdots\cdots T_n}{n}$$

式中：$\bar{T}$——平均膜厚；

n——检测总点数。

最后，制成膜厚分布表及膜厚分布直方图，见表 2.4.3-10。

表 2.4.3-10 膜厚分布情况表

工程名称	E1125	涂装区域	203 分段 底边水舱	规定膜厚	250 μm
膜厚分布情况					
干膜厚度（μ）	点数	频率%	频率直方图（%） 10 20 30		
200—220	2	0.3			
220—240	10	4.3			
240—260	27	11.6			
260—280	40	17.2			
280—300	63	27.0			
300—320	48	20.6			
320—340	24	10.3			
340—360	11	4.7			
360—380	5	2.1			
380—400	3	1.3			
总计	233	100			

制表人： 年 月 日

4.3.3 常用的膜厚检测仪器

常用的膜厚检测仪分湿膜测厚仪和干膜测厚仪。测湿膜厚度有滚轮式湿膜厚度计，梳齿式湿膜厚度计。测干膜厚度计有磁力型杠杆式测厚仪、磁力型旋转式测厚仪、磁阻型电磁式测厚仪、涡流测厚仪。

目前，船舶涂装测定干膜厚度用的仪器如上述大致分为磁力型磁阻型两种。其共同点都是利用钢板对磁性探头的作用大小，随着两者之间的距离变化而变化这一原理而制成的。因

此只适合于测定钢板表面的油漆涂层或其他非磁性复盖层的厚度。

4.4 船舶各部位涂装质量验收项目

船舶各部位涂装质量验收项目见表 2.4.3-11。

表 2.4.3-11 各部位涂装质量验收项目

部位 \ 检验项目		表面处理	完工情况		干膜厚度⑥
			底漆完工	面漆完工	
船底②		△○①	△○	△○	△○
船体外板		△○	△○	△○	△○
露天甲板		△○	△○	△○	△
上层建筑暴露部位		△○	△○	△○	△
货油舱		△○	△○	△○	△○
压载水舱		△○	△○	△○	△○
货舱		△	△○	△○	△
贮藏室		△	△	△○	△
居住舱室内部		△	△	△○	△
机舱③		△○	△	△○	△
隔离舱		△	△	△○	△
锚链舱④		△○	△	△○	△○
空舱		△	△	△○	△
装件	桅杆	△	△	△○	△
	舱口盖	△	△	△○	△
	其它小件	△	△	△	
需涂装车间底漆的钢材表面⑤		△	△		△

① ○为规定的船舶所有人代表检验项目，
△为规定的船厂检验项目；
② 海水吸水箱在关闭前由船舶所有人代表检验；
③ 包括泵房舵机舱、冷冻机舱等；
④ 锚链舱在放置锚链前由船舶所有人代表检验；
⑤ 抽样检查；
⑥ 船底、船体外板，压载水舱、锚链舱规定由船舶所有人代表检验项目。

5 涂装的安全技术

涂装作业中，自始至终潜在着不安全的因素。要排除这些不安全的因素，必须认识施工过程中产生的粉尘、毒气、火烧、爆炸的危险性，采取安全技术管理的措施，方可避免危险事故的发生。

由于涂料组分中有机溶剂的挥发性，才会引起易燃易爆的危险性。涂料中某些成份还存在着有害的毒性。为防止涂装作业中的中毒、火烧、爆炸的事故，应了解涂装作业中与安全有密切关系的物化数据。如涂料的闪点、燃点、爆炸极限及有限空间作业明火指标，人孔结

构的密闭舱室里明火作业指标等。表 2.4.3-12 为涂料的物化数据及卫生指标。表 2.4.3-13 为各种溶剂的物化数据及卫生指标。

表 2.4.3-12　　　　涂料的物化数据及卫生指标

产品名称	闪点(℃)	爆炸下限体积(%)	符合健康要求的最低通风量 m³/l油漆	密度(kg/L)	溶剂种类 名称	允许浓度 ppm	允许浓度 mg/m³	含量(%)
环氧铁红车间底漆基料	4	1	1450	1.15	丙醇、异丙醇	400	980	5～20
					甲苯	100	375	>20
固化剂	0	1	1850	0.9	丙醇、异丙醇	409	980	>20
					甲苯	100	375	>20
					二甲苯	100	435	1～5
氯化橡胶铝粉底漆	30	1	1750	1.3	芳香油			>20
					石油溶剂	100	600	1～5
					二甲苯	100	435	5～7
氯化橡胶磁性漆	38	1	2200	1.0～1.15	芳香溶剂			>20
					石油溶剂	100	600	1～5
					二甲苯	100	435	1～5
氯化橡胶防污漆	31	1	1200	1.1～1.15	醋酸丁酯			1～5
					醋酸二丁酯	150	710	1～5
					芳香溶剂	100	435	>20
					二甲苯			
焦油环氧厚浆漆	25	1	900	1.10～1.50	正丁醇、异丁醇	50	150	1～5
					芳香溶剂			1～5
					二甲苯	100		5～20
固化剂	25	1	800	1.1	正丁醇、异丁醇	50	150	5～20
					2-乙氧基乙醇	50	185	1～5
					二甲苯	100	435	5～20
环氧饮用水舱漆	26	1	2050	1.4	正丁醇、异丁醇	50	150	5～20
					芳香溶剂			1～5
					二甲苯	100	435	5～20
固化剂	25	1	2500	0.9	正丁醇、异丁醇	50	150	>20
					2-乙氧基乙醇	50	185	1～5
					芳香溶剂			5～20
					二甲苯	100	435	>20
焦油环氧铝粉漆	25	1	575	1.35	2-乙氧基乙醇	50	185	1～5
					石油溶剂	100	600	1～5
					二甲苯	100	435	5～20
固化剂	25	1	650	0.95	二甲苯	100	435	>20
磷酸锌醇酸树脂底漆	35	1	700	1.3	石油溶剂	100	600	>20

表 2.4.3-13　各种溶剂的TLV（MAC）值和沸点、闪点、爆炸极限、燃点

溶剂名称	用于或存在于	沸点（区域）	闪点 ℃	爆炸极限值		燃点 ℃	TLV(MAC)① 值		我国最高允许浓度mg/m
				下限	上限		ppm	mg/m³	
溶剂汽油	溶剂和稀释剂	160～200	19	1	6	230	500	2000	350
苯	溶剂与	80	11	1.2	8	555	25	80	40
甲苯		111	6	1.2	7	535	200	750	100
二甲苯	稀释剂	144	27	1.0	6	465	100	435	100
乙醇	去漆剂	78	12	3.5	150	425	1000	1900	1500③
异丙醇	溶剂和稀	82	12	2.0	12.0	425	200	500	200
丁醇	释剂	108	27	1.7	10.9	430	100	300	200
醋酸乙酯	溶剂和	77	-4	22	11.5	460	400	1400	300
醋酸丁酯	稀释剂	127	25	1.2	7.5	370	150	710	300
丙酮	溶剂和	5.6	-20	2.5	13.0	540	1000	2400	400
甲基乙基酮		80	-4	1.8	11.5	505	200	590	—
甲基异丁基酮	稀释剂	117	15	1.4	7.5	460	110	410	—
乙二醇乙醚	溶剂和稀释剂	135	40	1.8	15.7	235	200	740	—
环己酮②	溶剂和稀释剂	156.7	43.6	1.1	9.4	510	50	200	50
四氯化碳	脱脂剂	121	极毒				10	65	25
三氯甲烷	去漆剂	40					500	1740	—
有机锡化合物	防污漆	—	—	—	—	—	—	0.1	—
烟雾（氧化） 铬	电焊烟雾	—	—	—	—	—	—	0.1	0.05
烟雾（氧化） 铜	电焊烟雾	—	—	—	—	—	—	0.1	—
烟雾（氧化） 铅	电焊烟雾	—	—	—	—	—	—	0.2	0.03
烟雾（氧化） 铁	电焊烟雾	—	—	—	—	—	—	10	—
烟雾（氧化） 锌	电焊烟雾	—	—	—	—	—	—	5	5

① TLV（MAC）值的列表是从美国政府工业卫生学家的报告中获得的。
② 环乙酮一项数据不是原列表中的数据。
③ 1977 年以前的卫生标准。

5.1　涂料的物化性能

1)涂料的闪点：

闪点指涂料里的混合溶剂挥发出来的混合气体与空气的组成达到可燃浓度时，遇到火源，就会火光一闪，这种闪光现象的最低温度被称之为闪点。在闪点以下的温度，不会引起涂料的燃烧，因为新的混合气体还来不及形成，燃烧就停止了。涂料的闪点愈低，危险性愈大。因此闪点应视为涂料以及涂料施工中防火防爆的物理参数。可以从两个方面对闪点分级：

（1）根据化学危险品仓库管理安全分为四级：

闪点在 28℃ 以下，为一级易燃品；

闪点在 28～45℃，为二级易燃品；

闪点在 45～120℃，为三级易燃品；

闪点在 120℃ 以上，为四级易燃品。

（2）根据国家船检局《钢质海船入级与建造规范》，把闪点分为：

28℃ 以下，为一级易燃品；

28℃～65℃，为二级易燃品；

65℃以上，为三级易燃品。

目前，国内所提供的涂料产品，几乎所有的涂料闪点均属一、二级易燃品。闪点越低，易燃易爆的危险性就越大。

2)涂料的燃点；

当涂料达到闪火现象的最低温度时，即达到闪点后，如果继续提高涂料的温度，则可以使涂料挥发出的溶剂气体与空气混合组成的气体继续闪火，生成的火焰越来越大，当达到某一温度时，所生成的火焰不再自行熄灭（不少于5 s）这时就燃烧了。发生这种现象的最低温度，称为涂料的燃点。燃烧是发光发热的剧烈的化学反应，必须同时具备三个条件：存在可燃烧的物质；达到燃点以上的温度；存在足够数量的空气(氧气)。三者缺一，则燃烧现象不会发生。

3)涂料的爆炸极限：

一般沸点低，蒸气压高的有机溶剂，易形成爆炸性混合物。当形成混合性可燃气体产生闪火现象（闪点）时，可燃性气体过多或过少，都不会发生爆炸。这是受浓度限制的，把爆炸浓度的范围称之为爆炸极限。上限浓度称之为爆炸上限，下限浓度称之为爆炸下限。

发生闪火现象时，当形成混合、可燃性气体过多时，混合气体里含空气（氧气）不足，燃烧停止，不会发生爆炸；过少时，过剩的空气吸收了微小爆炸点放出的热，使爆炸的热不可能再扩散到其它部分，引起其它部分气体的燃烧。在涂料施工过程中，常测的是环境空气中可燃气体是否达到爆炸下限的浓度。

5.2 有限空间作业的明火作业指标

涂装作业中是严禁明火作业的。涂装作业完成之后，涂膜固化或干燥的过程，仍有溶剂挥发出来。要进行明火作业，必须严格进行安全测爆工作。目前各行业对安全空气条件控制不一。有为爆炸下限的25%，有为爆炸下限的10%，有为爆炸下限的1%或以下。根据船检规范船厂在舱室或人孔舱里进行明火作业时，执行安全空气的条件规定为爆炸下限的1%或以下，即为明火作业指标。

闪点、燃点、爆炸极限，明火作业指标都是涂料施工中应重视的物化数据。除此要杜绝一切火种，应做到：

防止明火的作用；

防止和灼热的物体接触；

防止电气设备和静电作用引起的火花；

防止化学反应释放出热的影响；

防止机械撞击、磨擦致使物体过热或放出火花；

防止光能影响，日光的聚光作用而使木材、回丝、纸片的自燃。

5.3 涂料的卫生指标

涂料组分中有毒性、有害性或在某种条件下组分物质分解出有毒的成分，这将危害作业者的身体健康。为保证作业者的安全，就得控制车间空气中有毒物质的最高容许浓度，称作卫生指标。该指标是指每立方米空气中所含有毒物质的毫克数，即mg/m^3。我国在这方面的卫生指标是预防工人在车间内慢性中毒的卫生指标，不能作为急性中毒的卫生指标，也不适应室外操作环境。保证工人经常的劳动中不发生急性、慢性的职业危害。美国的卫生指标TLV

（MAC）以ppm表示。是指工人 7 ～ 8 h的工作日，每周 40 h接触的平均浓度值，在一定范围内可以波动的。欧洲许多国家是执行该指标的。苏联的卫生指标，指的是一次接触限值，亦称应急接触时间限制，除规定浓度，还规定接触时间限制。

5.4 涂装危险等级的划分

根据涂料类型以及不同的类型所含主要溶剂，涂料的用量以及涂装作业所处的环境，衡量划分涂料场所危险的等级。见表 2.4.3-14、2.4.3-15、2.4.3-16。

表 2.4.3-14 有机溶剂毒性分类

类别	溶 剂 名 称	色别识别标志
第一类	三氯甲烷 二氯乙烷 四氯乙烷 二氯丁烷 二硫化碳 苯酚	红色
第二类	丙酮 环已酮 乙醚 丁醇 甲苯 二甲苯 重质苯 乙醇 醋酸乙酯 醋酸丁酯 醋酸戊酯 煤焦溶剂	黄色
第三类	松节油 松香水 松油 火油 石脑油	绿色

表 2.4.3-15 海船涂料危险等级

序号	涂 料 名 称	所 含 主 要 溶 剂	有机溶剂毒性类别	涂料危险等级
1	环氧树脂系涂料	甲苯、二甲苯、丁醇	2	I
2	氯化橡胶系涂料	二甲苯、煤焦、溶剂	2	I
3	环氧沥青系涂料	二甲苯、丁醇、酯类、酮类	2	I
4	醇酸酚醛树酯涂料	二甲苯、丁醇	2	I
5	沥青液	重质苯	2	I
6	以二类溶剂作为主要溶剂的其他涂料	第二类溶剂	2	I
7	漆酚改性涂料	煤焦溶剂	2	I
8	醇酸系涂料	松香水、松节油	3	II
9	酚醛树脂系涂料	松香水、松节油	3	II
10	船用凡立水	松香水、松节油	3	II
11	以三类溶剂作为主要溶剂的其他涂料	第三类溶剂	3	II
12	水溶性涂料			

表 2.4.3-16 涂装作业场所危险度的划分

序号	涂 装 作 业 场 所	作业危险等级
1	首尖舱、锚链舱、桅杆舱、轴隧、双层底内部污水处理舱、油罐内部、测深仪器室、冷藏舱和其它通风不良的舱室	第 I 危险部位
2	机舱、驾驶室、货舱、居住区内各舱室、通道、船上仓库及特殊涂漆车间（工场）	第 II 危险部位
3	除上述涂漆作业以下的露天涂漆作业场所及钢材自动抛丸除锈喷涂底漆车间或钢材预处理流水线车间	

从以上三表中可知，船舶涂装作业场所危险的部位与涂料的危险等级，两者结合形成了下表船舶涂装作业危险度的标准。即表 2.4.3-17。

表 2.4.3-17　船舶涂装作业危险度的标准

涂漆作业场所的危险度	涂料危险等级	船舶涂漆作业危险度标准
第Ⅰ危险部位	第Ⅰ危险等级 第Ⅱ危险等级	Ⅰ级危险度
第Ⅱ危险部位	第Ⅰ危险等级 第Ⅱ危险等级	Ⅱ级危险度
第Ⅲ危险部位	第Ⅰ危险等级 第Ⅱ危险等级 第Ⅲ危险等级	Ⅲ级危险度

5.5 涂装作业的安全管理

5.5.1　对Ⅰ级危险度的船舶涂装作业的安全规定

1)划出涂装作业危险禁界线，要挂出严禁火种安全牌，禁止明火作业的范围及期限规定。

2)换气装置或通风、照明及电器具均为防爆型、排进气管路等部件要使用不发生静电火花的材料制作。

3)要分配二人以上共同操作。若作业场所狭窄，只能容纳一人操作时，应设另一人在外负责监护。

4)涂装作业时，检测的有机气体浓度不超过涂装作业浓度。

5)作业者不带任何火种进入作业区，不穿带静电质料工作服和鞋，带防毒面具，登高作业带安全带等。

6)设专职安全员、消防员巡回检查。

7)涂装作业毕，应把剩余的涂料全部撤离场所。

8)涂膜干燥或固化过程，应继续排风，直至挥发出的有机溶剂浓度符合卫生指标。

9)有限空间，即狭窄的舱室进、排气孔至少各开一个，通风孔的位置应设在对角处。当只有一个人孔时，应另增设一个工艺孔。

5.5.2　对Ⅱ级危险度的船舶涂装作业的安全规定

1)设置作业危险区域禁界线;

2)充分通风换气;

3)采用防爆型照明灯具。局部照明宜用手携式安全灯具。

4)应有的个体劳动保护，登高作业应系安全带。

5.5.3　对Ⅲ级危险度的船舶涂装作业安全的规定

1)严禁火种;

2)充分注意通风换气

3)注意个体劳动保护

6　涂料储存注意事项

为使涂料质量长期保持稳定，需根据涂料种类，决定储存条件，一般应做到:

(1)涂料储存要保持室内清洁，不准堆放杂物。

(2)一般涂料应置于0℃以上、40℃以下环境中储存，最佳室内温度保持在8℃以上、30℃以下，相对湿度70%以下。

(3)涂料仓库必须通风良好，且阳光不能直接照射在涂料上。室外临时堆放也得具有遮

阳避雨设施。

（4）为避免涂料中的颜料沉淀和结块，每 2 ～ 3 个月应将每罐涂料上下倒置一次，尤其是含铅锌防锈漆和含氧化亚铜防污漆更需要这样。

（5）要严格管理低闪点涂料，严禁烟火。

（6）库存涂料的发放。应先入库先发放，尽量在储存稳定期内全部发放完毕。一般涂料的储存稳定有效期为一年，锌粉涂料为六个月。

（7）如果涂料已超过储存稳定有效期，使用前应检查其状态。确认没有变质方可使用。

（8）仓库照明和电器设备应采用防爆型。

第 4 章　机 舱 涂 料

对于船舶机舱涂料，根据部位不同，选择适当的涂料系统，一般说机舱花铁板以上的部位的涂料，要求具有耐腐蚀，耐油、容易清洁，且不会泛黄，保持光泽等性能。常规涂料是采用醇酸树酯为基料组成的。底漆以醇酸树脂漆或油性漆、面漆为醇酸磁漆。花铁板以下部位的涂料要求防腐蚀、耐水、耐油，防火等。总之不求美观，一定要耐腐蚀。因而也常用高性能涂料，以煤焦油环氧或环氧树脂为基料的涂料组成。总的干膜厚度为 200～300 μm

1　船舶机舱各部位涂装

船舶机舱各部位涂装见表 2.4.4-1。

表 2.4.4-1　船舶机舱各部位涂装摘要

动力设备{主机、辅机 车床机修	表　面 预处理	要求涂料的性能 耐油、耐污、易于清洗	适当的涂料系统或 其它保护方法
机舱间 油水分离器间	Sa2.5	耐油、耐热、抗潮、 耐寒等性能	醇酸配套或焦油环氧 漆配套
烟囱内部 主辅机热气管	Sa2.5	耐油、耐高温 自干性、耐 200℃	有机硅漆 银粉漆
仪表机械等	Sa2.5	耐油牢固、光泽、色彩鲜艳	
集控室内部	Sa2.5	光洁、耐油	醇酸漆配套或焦油环氧漆
水箱 油水舱	Sa2.5 Sa2.5以上	防锈、耐水、浅色 耐油、耐水、浅色	环氧漆、油性酚醛树脂漆 漆酚漆或纯环氧、环氧类
燃油舱 润滑油舱 汽轮机燃料舱	Sa2.5以上 Sa2.5	耐腐蚀、耐水、耐燃油 耐润滑油 耐油、防污	防锈油、指柴油或石油 树脂漆 涂环氧树脂漆≥250 μm
污水舱 废水舱 管弄	Sa2.5	耐水、耐污 色彩标志作用 附着力好，耐水、耐油	酚醛树脂漆 醇酸漆

2　常用机舱涂料的类型和组成

2.1　常规涂料

1)油性漆是用虫胶、甘油松香与干性植物油混合熬炼的漆料，与氧化铁红、体质颜料等混合研磨，并加入催化剂及 200 号溶剂汽油调制而成的。

有很好的耐机油性、耐洗擦。主要用于船舶机舱、油箱内外部位的耐油保护涂层。

2)酚醛调合漆：各色酚醛调合漆是用油度酚醛漆料与颜料及适量体质颜料混合研磨后，加入催干剂及 200 号溶剂汽油调制而成。

漆膜坚硬，光亮，颜色鲜艳。有较好的耐候性。适用于室内外一切金属、木质表面保护与装饰作用，亦可用于船舶、机器等部件。各色的酚醛磁漆亦可用于船舶机舱的机械设备上。

3)铁红防锈漆、是用氧化铁红与氧化锌为主要防锈颜料与酚醛漆料研磨调制而成。

耐高温，经切割、电焊等加工，不产生有毒气体。防锈性差，亦可适用于机舱内部打底用，可防火。

4)醇酸磁漆：各色醇酸磁漆是由植物油改性的季戊四醇醇酸树脂与颜料混合加入催干剂，并以200号溶剂汽油或松节油与二甲苯调制而成。

干性好，漆膜坚韧光亮，颜色鲜艳。附着力好，耐候性佳。

适用于船舶内舱机器和房屋门窗及一切室内外金属木材制品表面保护与装饰。

5)煤焦沥青漆是用煤焦沥青及煤焦溶剂配制而成。

干性快，耐水性强，具有防锈防腐、防水等性能。但不耐油及日光曝晒。

适用于船舶的煤舱和锚链舱等，亦可用于船舶机舱的污水舱、废水舱等部位。

附着力好，较好的防锈性和耐水性、耐油性，用作阴极保护用，耐干湿交替。

适用于船舶的船底和水线部位防锈底漆。亦可用于船舶机舱花铁板以下部位以及油水箱等。

机舱涂料的性能、主要是耐油、耐水、耐污、耐冲击，便于清洗。见表2.4.4-2。

表2.4.4-2　　常用机舱涂料的性能

常用涂料	名称	性能
常规涂料	F53-4 锌黄酚醛防锈漆	防锈性好，不含红丹，进行热工作业时，不产生毒害
	C53-3 锌黄醇酸防锈漆	干燥性好，干燥快
	X53-1 铁红乙稀防锈漆	干性快，具有良好的耐水性，耐石油性耐化学物品性，防锈性能
	铝粉铁红防锈漆	漆膜坚韧、附着力强、耐高温烘烧、防锈性好、干燥快、施工方便
	C06-1 铁红醇酸底漆	良好的附着力和防锈能力，与硝基磁漆，醇酸磁漆等多种面漆层间结合力好一般气候条件下，耐候性好
	F03-1 各色酚醛调和漆	漆膜坚硬光亮，颜色鲜艳，耐候性好。漆膜光亮平滑，坚韧、干性比油性调合漆快
	F04-13 铁红虫胶磁漆	耐机油，耐洗擦
	F04-1 各色酚醛磁漆	漆膜坚硬，光泽、附着力较好，但耐候性较差
	C04-42 各色醇酸磁漆	干性好，但表干时间较长，干后漆膜坚韧光亮，颜色鲜艳，对金属附着力强，耐候性亦佳
	C04-48 各色醇酸磁漆	坚韧光亮，颜色鲜艳、耐油、耐热、附着力好，耐候性亦佳，一定的耐水性
	C54-31(C54-1) 各色醇酸耐油漆	对机油具有较强的抵抗力，漆膜坚韧，并且具有一定的抗冲击强度

续上表

常用涂料	名　　称	性　　能
常规涂料	F06-1 各色酚醛底漆	漆膜坚硬，容易打磨平滑、能增加硝基漆与金属面的附着力，耐硝基性能强
	F06-11 白酚醛底漆	涂刷性好，遮盖力强、用量省
	F50-31(F50-1) 各色酚醛耐酸漆	干性较好，且能抵御酸性气体的腐蚀，但不宜浸渍在酸中
	F53-38(F53-8) 铝铁酚醛防锈漆	漆膜坚韧，附着力强，能受高温烘烤且不会产生有毒气体，干性快，施工方便
	L10-17 煤焦沥青漆	干性快速，耐水性强，涂刷方便，价廉防锈，防腐、防水等，唯不能抗油和日光曝晒
高性能涂料	无溶剂环氧油水舱漆	无气味，耐油、耐水及油水交替的特性，因为无溶剂、施工安全
	有机硅漆	耐热、抗潮、耐油、耐大气腐蚀等
	H54-31(H54-82) 棕环氧沥青耐油漆 H54-81(H54-2) 铝粉环氧沥青耐油底漆	耐油、耐水性好，能经受海水与石油产品交替腐蚀作用 H54-31(面漆)与H54-82(底漆) 互为配套使用
	H01-6 环氧酯清漆	漆膜硬度较好，耐潮，耐酸，碱性好
	S01-6(清漆) S54-33(磁漆) S06-5(底漆) 聚氨酯油漆	漆膜丰满光亮，耐磨性好，附着力强并且有较好的耐油、三防和耐化学性
	S04-7 各色聚氨酯磁漆 （7511 各色聚氨酯磁漆）	漆膜具有较好的附着力和良好的防腐性、耐油、耐磨及耐水性
	H06-4 环氧富锌底漆	良好的附着力、耐磨性、并有特强的防锈性能
	聚氨基甲酸酯油舱面漆 聚氨基甲酸酯油舱底漆	耐高级汽油、耐柴油、耐油等，耐油水交替、耐化学品等特性、漆膜坚韧、丰满度好、附着力强、干燥快

机舱涂料的技术标准，指机舱涂料的一些主要技术指标，如漆膜的颜色与外观、粘度、冲击、耐水、耐油等技术指标。见表 2.4.4-3。

2.2 高性能涂料

1)环氧沥青漆：由环氧树脂为主加入防锈颜料，用胺类化合物作固化剂，使用时，甲、乙组分按比例混合。具有附着力强，耐水、耐油等性能。

2)聚氨酯漆：以聚酯树酯为基料，加入防锈颜料、有机溶剂等配制而成。具有耐磨性好，附着力强，具有耐油性能，且漆膜丰满。

3)有机硅漆：由有机硅树脂与铝粉配制而成。具有耐高温、抗潮，耐油，耐大气腐蚀等性能。但适用于 300℃以下要求的耐温构件。

表 2.4.4-3

常用机舱涂料的技术指标

项目 \ 指标 \ 名称	F53-4		C53-3	X53-1	C06-1	F03-1	F04-1	F04-13	C54-1	C04-42	C04-48	L01-17	H53-34	Y53-31	F53-31
	锌黄酚醛防锈漆	铝粉铁红防锈漆	锌黄醇酸防锈漆	铁红乙烯防锈漆	铁红醇酸底漆	酚醛调合漆	酚醛磁漆	铁红虫胶磁漆	醇酸耐机油漆	醇酸磁漆	醇酸磁漆	煤焦沥青	环氧沥青	红丹油性防锈漆	红丹酚醛防锈漆
漆膜颜色和外观	淡黄或深黄允许略有刷痕	灰红色漆膜并略有刷痕	淡黄、深黄色	符合标准样板，漆膜平整允许刷痕	平整无光、色调不定	符合标准样板及其色差范围、漆膜平整光滑	符合标准样板及色差范围、漆膜平整光滑	铁红附合标准样板色差范围	浅灰、奶黄	符合标准板色差范围漆膜平整光滑	符合标准样板及其色差范围、漆膜平整光滑	黑色光亮	银灰	桔红	桔红
流出时间(涂-4 杯秒/计)	75~120	50~90	60~120	15~30	60~120	70~120	70~100	40~90	60~120	铝色30~60 蓝灰，湖蓝60~120	60~90	25~40		30~80	40~80
细度(μm)≤	50	70	60	80	50	40	30	50	40	40	20		90	60	60
光泽(%)≥	30~60		60				90		80	80	90				
附着力(级)≤					1		2			2	2				
遮盖力(g/m²)≤	180	60	200			红色180 灰色80 黄色180 蓝色100，白色120 绿色80 铁红60	红色、黄色160，浅灰100 绿色灰色70 铁红、草绿60 蓝色80、铝色50	80	150	铝色40，蓝灰80 湖蓝120	蓝色80，白色110，灰色55 红色140，黑色40，淡黄140			220	220
干燥时间 表干(h)≤	5	3	4	2	2	10	6	4	4	4	12		4	8	5
干燥时间 实干(h)≤	24	24	24	12	24	24	18	36	24	24	18	2	24	24	24
干燥时间 烘干(60~70℃)											3	18			
耐盐水性	漆膜无变化允许颜色变浅			15 天不起泡	24 小时不起泡不生锈								充分固化7 d 达到 2 级		
硬度≥					0.30		0.25				0.25				0.20
柔韧性 (mm)	1					1	1		1		1				
冲击强度(kg·cm/cm²)		50			50		50		40		50				50
耐水性(8h)							附着力不减、浸水 2 h，恢复 2 h				允许微失光，变白小泡能于 3 h 内恢复	浸入 25±1℃ 30%盐水中 5 d不起泡。		5不起泡，不生锈	5 不起泡不生锈
耐汽油性(浸于SYB100260SR H-70号汽油中5h)								耐机油性(7 d)不起泡	耐机油漆膜经72h干燥后，浸于50℃机油中72h不起泡		不起泡、不起皮、允许失光、1 小时内恢复				

3　机舱涂料的配套系统

根据机舱各部位，采用常规涂料配套或高性能涂料配套，见表2.4.4-4。

表2.4.4-4　　　　　　　　　　　　　　　**机舱涂料配套举例**

机舱部位			涂料配套			漆膜总厚度（μm）
围壁	天花板		铁红防锈漆	醇酸白漆	醇酸白漆	
	天花板至花铁板		铁红防锈漆	醇酸白漆	醇酸白漆	80～100
	花铁板至双层底顶		铁红防锈漆	醇酸白漆	醇酸白漆	80～100
	绝缘层		铁红防锈漆	铁粉防锈漆		20～40
地板	双层底顶部		焦油环氧	焦沥环氧		200～250
	花铁板	上表面	铁红防锈漆	醇酸漆		80～100
		下表面	焦油环氧	焦油环氧		200～250
	机舱平台		铁红防锈漆	铁红防锈漆	醇酸漆	80～100
	机座下部、污水井		焦油环氧	焦油环氧		200～250
管子外壁	镀锌管			醇酸白漆	醇酸白漆	80～100
	花铁板以下		焦油环氧	焦油环氧		200～250
	绝缘管		银粉漆			20～40
	钢管		铁红防锈漆	醇酸白漆	醇酸白漆	80～100
动力	绝缘材料外侧	镀锌件表面	wp	氯化橡胶	氯化橡胶	80～100
		除此以外	醇酸白漆			35～40
设备舱	主机		按制造厂的标准			
	锅炉					
	辅机					
油舱	燃油舱润滑油舱 柴油舱		不涂漆，表面清理后涂石油树脂漆或揩油全部清洁、不做油漆、清洁处理、不涂漆、揩防锈油、			
管路	按船舶管路油漆颜色和识别符号GB248-75标准进行着色。				焦油环氧二度	250

4　船舶管路的颜色与标志

船舶内部所有的管路，都需按照各种不同性质的系统各种不同颜色的油漆作指示、标志之用，常规涂料一般用的是各色酚醛标志漆和醇酸漆，近年来也有用的各色氯化橡胶漆、环氧类漆。

4.1　船舶管路系统油漆颜色和识别符号

1）凡主机舱、锅炉舱、辅机舱、制冷机舱的各种管路均按标准规定进行着色，但交通运输船舶，工作船舶和渔船在上述各舱内花钢板下的各种管路，其着色可以与该舱舱底壳相同。

2）凡敷设于各舱室的天花板或隔壁等内的陈蔽管路，一律按标准规定进行着色。

3）上述各项规定以外的管路，其着色均与所在舱室的环境着色相同。如有特殊要求时，亦可按标准规定进行着色，但下列管路必须按如下规定进行着色：

（1）全部消防管路一律着红色；

（2）全部暖气管路一律着银色；

（3）全部暖气的排气管路一律着红色；

（4）管路油漆颜色及识别符号与颜色按表 2.4.4-5(摘自 CB248—75)。

管路识别符号的箭头所指方向，表示管内介质流向。对介质可以双向流动的管路，应在相反方向再划一个箭头，如图 2.4.4-1。管路识别符号尺寸按图 2.4.4-2～图 2.4.4-4。

4.2 识别符号的油漆规定

1)识别符号应涂在管路距机械设备、甲板、隔舱壁以及管路交叉点约 500 mm处，直管圆周方向涂得长一点，箭头符号应涂于管路向外易见处。

2)包有绝热层的管路的识别符号均涂于绝热层外表面，决定识别符号的尺寸及数量时均以绝热层外径为准。

3)管径≤15 mm的管路的识别符号，其箭头尺寸按实际情况适当缩小，过小的管路（如仪表接管等），可不涂识别符号。

4)如小型船舶的管路简单，很易识别，则视实际情况，可以不涂识别符号。

表 2.4.4-5　　船舶管路油漆颜色和识别符号

管路名称与颜色		识别符号与颜色	
冷剂液管路	蓝 色		白 色
冷剂回气管路	蓝 色		白 色
冷剂排气管路	蓝 色		白 色
盐水管路	蓝 色		白 色
舷外水（海、河水）管路	绿 色		白 色
卫生水管路	绿 色		白 色
压载水管路	绿 色		白 色

续上表

管路名称与颜色		识别符号与颜色	
舱底水管路	黑 色		白 色
疏水、排水或泄水管路	黑 色		白 色
粪便或污水管路	黑 色		白 色
液体燃料吸入或输送管路	棕 色		红 色
液体燃料压力管路	棕 色		红 色
润滑油吸入或输送管路	黄 色		红 色
润滑油压力管路	黄 色		红 色
润滑油回油或污油管路	黄 色		红 色
液压传动装置管路	黄 色		红 色
低压空气管路	浅蓝色		白 色
中压空气管路	浅蓝色		白 色

续上表

管路名称与颜色		识别符号与颜色	
高压空气管路	浅蓝色		白　色
氧气管路	浅蓝色		红　色
空气、测量、注入、仪表或溢流管路	按介质	按介质	按介质

管径＜32mm的管路

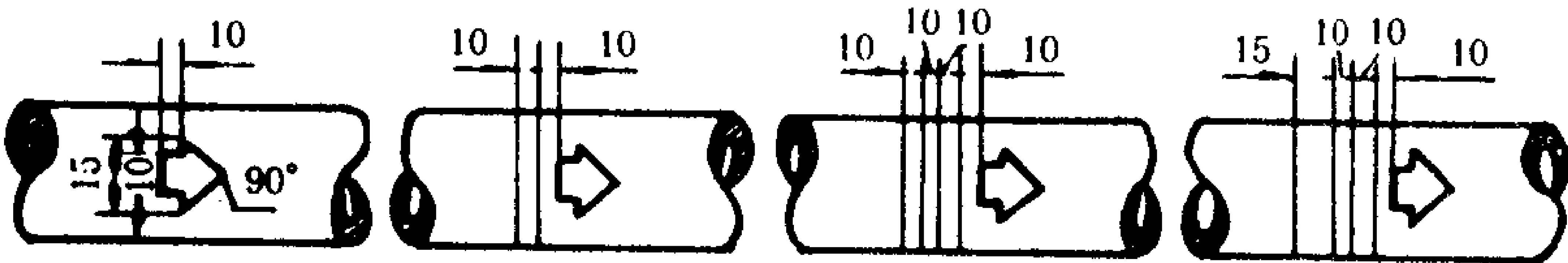


图 2.4.4-1　管内介质流向表示

管径＝40～80 mm的管路

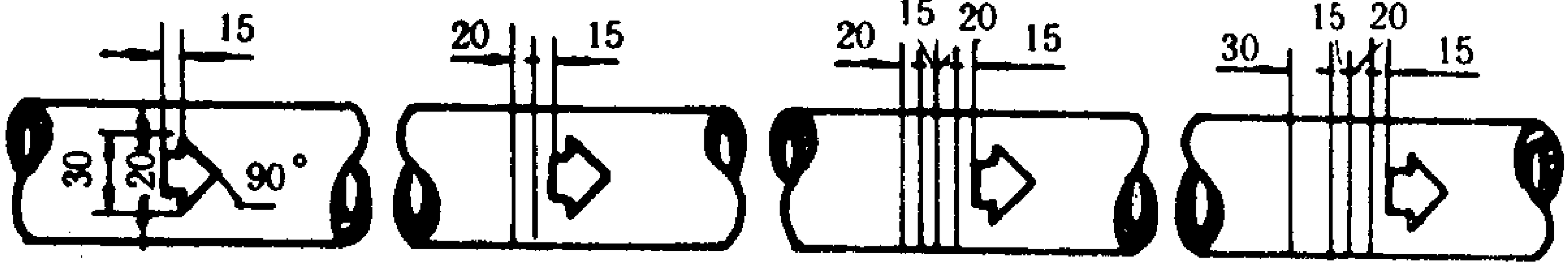


图 2.4.4-2　管路识别符号（一）

管径≥100 mm的管路

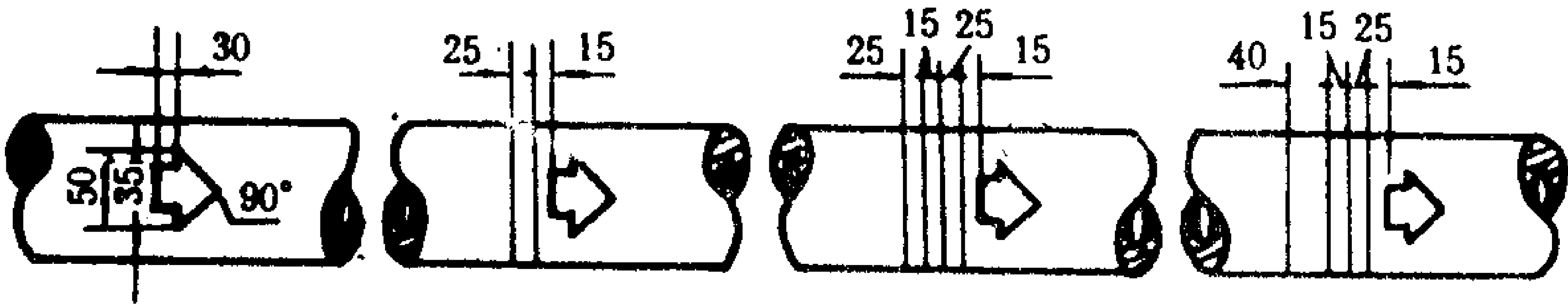


图 2.4.4-3　管路识别符号（二）

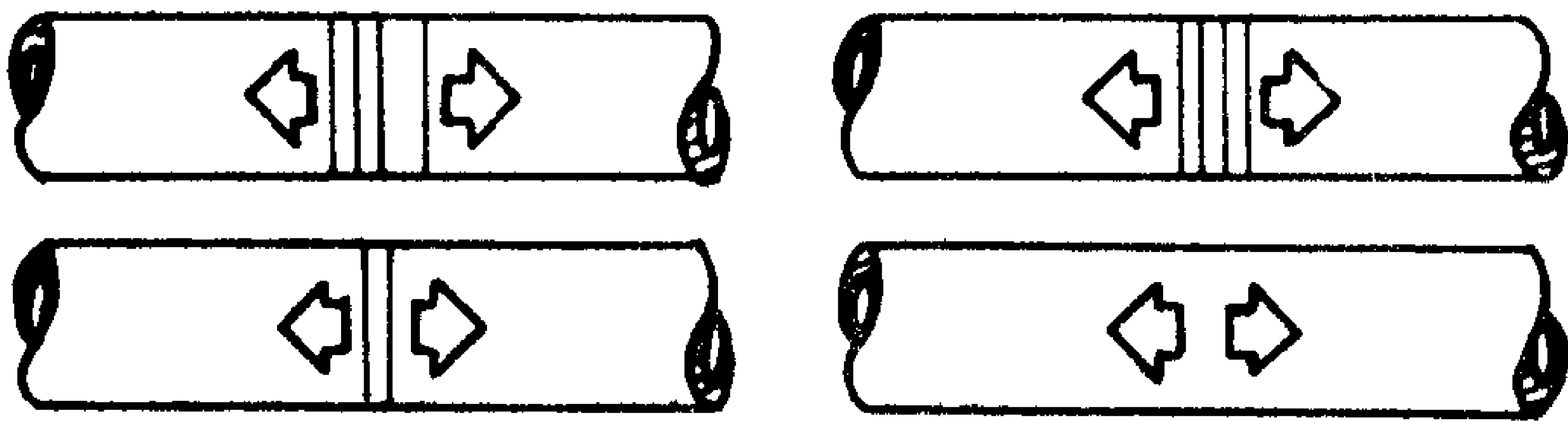


图 2.4.4-4　管路识别符号（三）

表 2.4.4-6　　柴油机涂面漆的颜色

表面名称	柴油机外表面	燃油管系	机油管系	空气管系	淡水管系	海水管系
颜　色	深　灰	棕	中　黄	天　蓝	淡　灰	翠　绿

注：小功率柴油机的管系可与外表面涂同一颜色。

4.3　柴油机涂装技术条件

（1）凡零部件的不加工表面及外露部分一般均须涂漆。

（2）零部件在检验合格后方可涂漆。柴油机最后的涂面漆一般应在试车结束后出厂前进行。

（3）柴油机涂面漆的颜色应符合表 2.4.4-6 规定。

（4）涂装前，零部件表面不得有砂粒，炭灰、焊渣、铁锈、锐边、毛刺、污物、油腻和水，并使表面干燥。

（5）涂漆工作场地必须保持清洁、干燥和通风。

（6）柴油机表面一般涂底漆各 1 ～ 2 次。零件外表面如有明显的凹陷和粗糙，需先涂腻子，然后再涂漆。腻子应薄而均匀并打磨光滑。腻子必须牢固地附着于表面。

（7）漆膜应光滑均匀，不允许有流挂、刷痕、发粘、失光、针孔、麻点、凸粒、起泡、皱皮、龟裂、剥落和漏涂等缺陷。

对损坏的漆膜必须按上述要求修补。

4.4　柴油机零部件常规涂装工艺

柴油机零部件所需的常规涂料配套要求达到的漆膜厚度和涂装工艺要求见表 2.4.4-7。

表 2.4.4-7　　柴油机零部件常规涂装工艺

部　件	涂　料　配　套	漆膜厚 (μm)	工　艺　要　求
曲轴	1.铁红磷化底漆 各色环氧面漆 2.醇酸防锈底漆 全色醇酸面漆 3.铁红聚氨酯底漆 全色聚氨酯面漆	10 40 40 40 40 40	1.非机加工表面喷射处理达到 S_a2.5 级表面粗糙度 R_a为 50 μm 2.涂装的机加工表面粗糙度 R_a为 12.5 μm，涂装前表面必须严格除油
机架 机座 气缸体	1.环氧富锌底漆 各色环氧面漆 2.醇酸防锈底漆 醇酸面漆 3.铁红聚氨酯底漆 全色聚氨酯面漆	35 40 40 40 40 40	

续上表

部　件	涂 料 配 套	漆膜厚 (μm)	工 艺 要 求
扫气箱 排气管	无机锌底漆 烃类树脂耐热漆	65 25	3.环氧涂料，超过涂装间隔经打磨处理后，方可再涂装。
蒸汽管道暖气片	醇酸防锈漆 铝粉漆	40 25	4.烃类树脂耐热漆耐温达 400℃以上，对加热型的涂料涂装后要加热至 400℃以上，具体施工可在柴油机动车前进行
轮机底座 机械设备	醇酸防锈漆 醇酸树脂面漆	80 70	5.用柴油机本身的热量，使涂料干燥。 涂防火底漆或涂刷醇酸环氧，红丹等防锈底漆、膨胀型涂料为常用涂料的 3～4 倍，以刷涂为主，按规定涂装间隔进行涂刷
电　器	电缆按规范涂防火涂料 FR-A 阻燃型醇酸防火漆	2 mm	

5　机舱涂装注意事项

5.1　机舱涂料施工安全

机舱部位，特别是双层底部位，是属于密闭的或者狭窄的空间，把这些空间称之为有限空间。在有限空间作业，一般指涂装与焊接作业，故要遵照有限空间作业的安全规定。因此双层底的涂装最好安排在分段上进行。当在机舱有限空间进行涂装作业时，要遵照 I 级危险度的船舶涂装的安全规定。

5.2　双组分涂料涂装

当船下水后，机舱如果使用双组分涂料，例如环氧涂料，应观察船体钢板的露点，因为双层底部位浸水，当达到钢板露点，将产生结露现象。最好进行分段上涂装，船下水后，机舱部位仅进行涂料的修补和清洁工作。

5.3　机舱大面积涂料涂装

当机舱进行大面积涂装时，要与有关部门联系，要设立警戒线、设置通风设备等安全设施，以保证涂装作业安全。

5.4　机舱设备零部件涂装

要配合主机、辅机及其他舣装件安装时间进行涂装。

5.5　机舱内涂装

在机舱内进行涂装作业时，为了防止污染、要使用不易燃材料做成的罩子，把机舱里各种机械的内部和其他活动部件，铭牌，仪器、仪表等遮盖、保护好。

5.6　机舱设备运转部件的涂装

机舱里运转设备部件附近不能采用喷涂，以防止漆污染部件。

6 用于机舱的新型涂料

6.1 高性能涂料

6.1.1 氯化橡胶涂料

氯化橡胶涂料是物理干燥类型，具有耐水、耐酸碱的性能，但不耐溶剂和动植物油。目前极少用于机舱内，但可用于机舱的天花板，甲板部位。

6.1.2 焦油环氧涂料

焦油环氧涂料是化学固化类型，具有极好的耐水，耐化学品，耐油等性能。与钢板附着力良好，漆膜坚硬，被广泛使用于船舶的各部位，目前机舱的双层底部位亦已采用。特别厚涂层的焦油环氧漆，涂装二遍，漆膜厚度可达 200～250 μm。双组分环氧类涂料，固化温度在 10℃以上，因此要求施工的环境温度不低于 10℃。

6.1.3 防火涂料

船舶的机舱，厨房以及木质结构部分，需加强防火措施；用于这部分的涂料，应是防火涂料。防火涂料能阻止表面易燃材料着火。钢结构表面在着火的情况下，由于火焰蔓延，温度上升，会影响钢结构的强度。防火涂料可以起保护作用。

防火涂料一般含有氯的粘接剂以及阻燃、防火的颜料等组成。含氯粘接剂为氯化橡胶类，颜料为氧化铜，氧化锑等。这种防火涂料受热时，能放出不易燃的气体或隔绝层。以发泡型防火涂料效果最佳，受热时，涂层表面上能形成一层厚的隔热层，并能经得起长时间的高温。

酚醛型防火漆和氯化橡胶防火漆，主要采用三氧化二锑作为防火剂，并添加含有卤素的化合物等组成。与普通漆相比，有一点阻燃作用，但还不符合现今的消防防火的要求。目前国内防火性能较好的品种有膨胀型丙烯酸乳胶防火涂料、膨胀型过氯乙烯防火涂料、改性氨基膨胀防火涂料、无机防火涂料等类型。新研制的 FR-A 阻燃型醇酸防火漆，防火性能优异，能达到一级防火等级。

目前，各类型防火漆有 F_{60-31}(F_{60-1})各色酚醛防火漆、FR-U-1 氯化橡胶防火漆、ER-U-1 环氧树脂防火漆。以及新研制的 FR-A阻燃型醇酸防火漆。以酚醛防火漆为例，说明防火漆技术指标的情况、见表 2.4.4-8。

表 2.4.4-8　各色酚醛防火漆 F_{60-31}（F_{60-1}）技术指标

编　号	项　目		指　标
1	漆膜颜色和外观		平整允许有刷痕
2	流出时间（粘度）（涂-4 粘度计 s）		75～120
3	细度（μm）　不大于		40
4	遮盖力（g/m）	白色　不大于	240
		灰色　不大于	150
5	干燥时间（h）	表干　不大于	4
		实干　不大于	24
6	耐燃性　(s)　不大于		30

6.2 防噪声涂料

涂覆在各种金属结构表面上，具有减振和隔声，绝热和一定密封性能的特种涂料。当结

构发生振动和噪声辐射时能通过材料粘性的内磨擦，将部分机械能转变为热能从而达到减振和消声的目的，亦可制成各种噪声源的隔声罩。

6.2.1 涂料的组成

防噪声涂料称为减振消声阻尼涂料，是由高分子树脂加入适量的填料以及辅助材料配制而成的。如丙烯酸树脂、环氧树脂、填料发泡剂等组成的涂料。高阻尼耐磨涂料又是一种新型的塑溶胶涂料。聚丙烯酯阻尼涂料是由聚氯乙烯树脂、其它合成树脂、颜料、填料、助剂和增塑剂组成。

6.2.2 防噪声涂料的特点

（1）具有优良的力学内耗性能；

（2）具有优良的耐磨蚀性能；

（3）具有优良的化学抗性，能耐酸、耐碱、耐盐水、耐盐雾，是理想的防腐蚀涂料；

（4）无臭、低毒、无公害，具有高闪点的特性。

6.2.3 防噪声涂料的技术条件与技术性能

（1）技术条件：指涂料的干性、外观、固体含量、抗冲击强度、贮藏期等项目。

（2）技术性能：指涂料的耐水性、耐油性、耐盐水性，耐盐雾性，内耗因子，弹性模量、内耗峰位值等，均应达到一定的技术数值。

6.2.4 防噪声涂料的施工

该涂料可用手工涂刷，机械喷涂等方式进行施工。自干、烘干均可。金属构件施工前，表面必须预处理，除油、除锈达到需要的除锈等级，使涂料保持原具有的优良附着力和抗冲击性能。

阻尼涂料需达到一定的涂层厚度，才能很好地发挥作用。应多次性涂覆，每次不宜太厚，每层干后再涂第二次，并且要干透，以保证一定的弹性模量，因此施工时应特别注意控制涂层的漆膜厚度。一般涂层厚度为基板的 2 倍或钢板重量的 20%。

$$W=2.4\times S\times d$$

式中：W——涂料的用量，kg；

S——底材面积，m^2；

d——底材厚度，mm。

涂料使用时的最佳温度和频率见表 2.4.4-9。

表 2.4.4-9 涂料使用时最佳的温度和频率表

种类	频率 (Hz)	温度 (℃)	频率 (Hz)	温度 (℃)	频率 (Hz)	温度 (℃)
#6731	14-18	-1	102-120	5	280-350	12
55#-1	13-20	21	94-135	35	265-395	35
54#-11	15-20	26	100-130	36	285-370	46
54#-12	14-20	36	107-140	45	300-405	45
80#-1	14-23	85	96-184	85	230-530	95

6.2.5 防噪声涂料应用范围

减振消声阻尼涂料被广泛应用于车辆，船舶和各类机床、机械设备的噪声控制。在船舶上多用于控制室等，也可以制成各种声源的隔声罩。

第5章　船用特种涂料

船用特种涂料，主要是指某些涂料用于船舶的某些部位以及对涂料某些特殊性能的要求。对船舶钢材预处理车间底漆，经性能认可试验后，还需经船舶检验部门的认可；对饮水舱涂料形成的涂膜对水质无影响，应符合卫生标准，需经相当级卫生部门认可；船底防污漆形成的涂膜应能防止或毒杀海洋生物的附着等。

1　车间底漆

车间底漆或称保养底漆或称预处理底漆。车间底漆选用原则：

（1）钢板的表面状况，要达到钢板表面处理的质量要求。

（2）根据船舶建造周期、钢板经过预处理后，加工时间长短，即根据防锈期限选用。

（3）根据防锈涂料的配套性选用，如高性能涂料一般要求无机锌车间底漆配套。

（4）船舶特殊部位如重防腐蚀区的涂料，涂料选用车间底漆的要求。

（5）建造船舶的类型：客船、油船、货船。

（6）选用毒性小或无毒性的车间底漆。

（7）钢材预处理流水线工艺的适应性，以及涂、喷的适应性再经综合，选用既符合性能要求，又经济的车间底漆。

1.1　车间底漆的类型

目前用于钢铁贮存、加工期间防锈蚀的有三大类型保养底漆，即磷化底漆、含锌底漆、无锌底漆。

1)磷化底漆，即洗涤底漆　磷化底漆是聚乙烯醇缩丁醛，盐基性锌黄，滑石粉的醇溶液和含有少量水的磷酸醇溶液组成的。二个组分在使用前按一定的比例混合，必须在8 h 内用完。也有一缸装的。当用到海船水下部位时，耐阴极保护性能较差，不能适应。

2)无锌车间底漆　无锌车间底漆由环氧树脂、氧化铁红、铬酸锌或钼酸锌、常和铁红、铁黄等组成。对钢板的附着力性能好，焊接性能好，配套性较好。防锈性能比含锌车间底漆稍差，但施工容易、切割、焊接时不会产生有害的锌蒸汽，产生的烟雾对人体无毒害。

无锌车间底漆亦有酚醛树脂、铝粉铁红等组成的油性车间底漆，但干燥性较差，不宜在钢材预处理流水线上喷涂。

而二罐装的冷固化环氧树脂漆，含氧化铁红及不含锌及铬系颜料的新型防锈料，无毒性、干燥快、基本适应钢板预处理流水线的工艺性能要求。对焊接性能无影响，切割烧损面积小，且烧损部位清晰，冷加工不易剥落，减轻了二次除锈耗费的劳动力。能与环氧、环氧沥青、氯化橡胶、乙烯类大多数油漆配套使用，也可用于受阴极保护区域。膜厚能达20～25 μm，具有3～6月的防锈期。

3)含锌车间底漆　含锌车间底漆可分为含富锌和低锌的。富锌车间底漆对钢铁具有优异的防锈性和耐候性。

富锌底漆根据基料又可分为无机型、有机型两类。

有机型以富锌、环氧树脂和硅酸（四）乙酯为基料的车间底漆。以含有水的硅酸碱为基

料的，是水溶性组成为不易燃的涂料；以含有易挥发的有机溶剂的，是易燃的涂料。

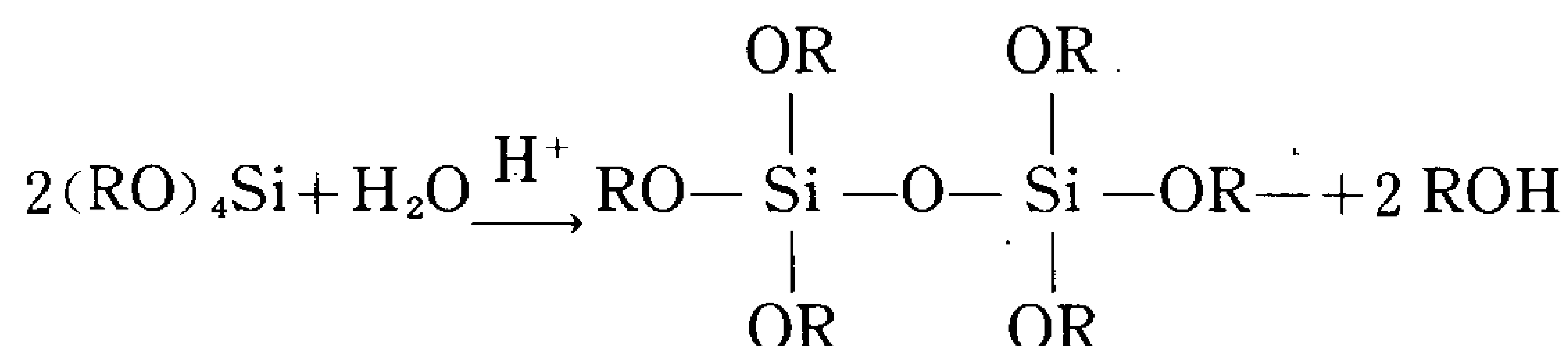
有机富锌底漆是采用合成树脂作漆料，挥发型漆料，如氯化橡胶、乙烯类树脂等。化学固化型漆料如胺固化环氧、环氧—聚酰胺、环氧酯、聚氨酯等。一般有机富锌底漆成膜较厚，适用于大气、浸水和化学腐蚀等环境。

无机富锌底漆分为硅酸钠水性后固型，硅酸钠水性自固型，正硅酸乙酯溶剂型自固型。

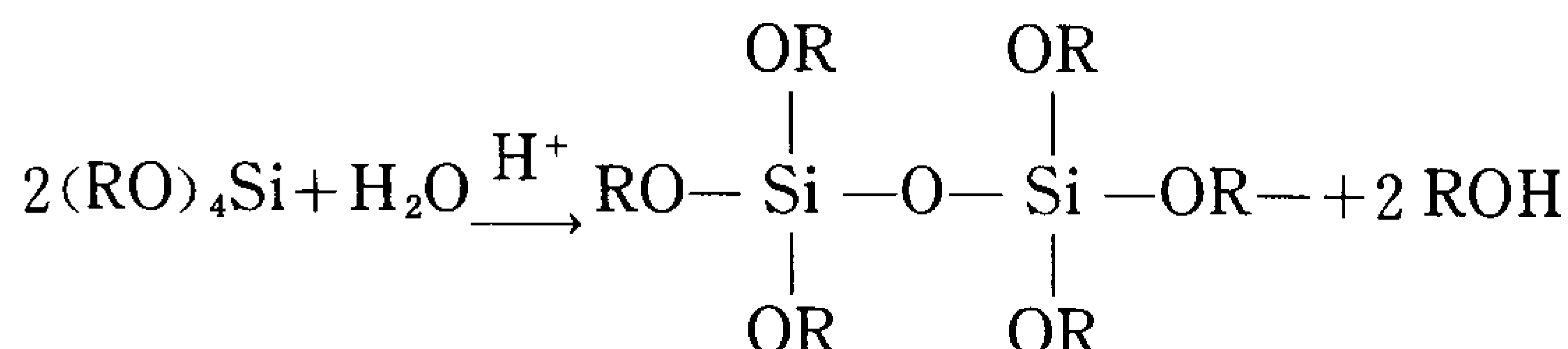
后固型，即是以锌粉和正硅酸（粘合剂）混合涂复于钢铁表面后，再继续涂刷一层酸性固化剂（磷酸或氯化镁溶液），涂层才能固化。

自固化型，涂刷或自动喷涂后，吸收空气中的 CO_2 等就可发生化学变化而固化。所以钢材预处理流水线上使用的无机锌车间底漆就是属于自固化型的。

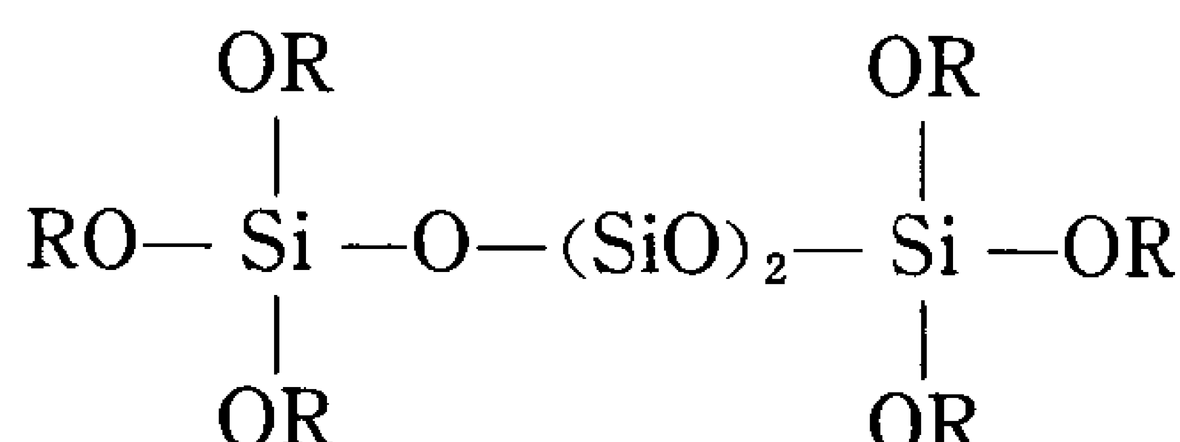
自固化型正硅酸乙酯无机锌涂层固化的化学反应如下：



该涂层实际上是一种半无机粘合剂，可溶于有机溶剂中，涂刷和喷涂后正硅酸乙酯逐步水解转变成聚硅氧烷，最后转化成合金属锌的聚二氧化硅，其结构如下：



进一步吸收空气中的水分水解，形成聚合物结构：



无机锌涂料由于是锌粉和涂料起反应并和被涂金属形成化学结合，因此防锈性能很好。漆膜为无机结构，其耐热、耐磨、耐溶剂性能均强，耐候性也好。

富锌车间底漆的含锌粉量90%以上。低锌车间底漆指含锌粉量降至50%，加入一些还原性物质，以提高防锈性能。

一般无锌车间底漆，当干膜厚度20～25 μm，防锈期可达 3 ～ 6 个月；含锌车间底漆，当干膜厚度 15～20 μm 防锈期可达 6 ～ 9 个月。

1.2 车间底漆的性能

车间底漆一般闪点较低，无锌环氧铁红车间底漆闪点 4℃，大量车间底漆是用于钢材预处理流水线上，因此车间底漆必须具备以下几点性能：

（1）大气中保护，其防锈性能与车间底漆的类型及规定膜厚有关。

一般环氧铁红车间底漆，当干膜厚 20～25 μm时，保护期为 3 ～ 6 个月。

一般以含锌车间底漆保护效果为好。硅酸锌车间底漆当干膜厚为 15～20 μm 时，保护期为 9 ～12 个月。

（2）适应钢材预处理流水线工艺，干燥快。当钢板行程速度 2.5～ 3 m/min时，要求在 2

~ 3 min内干燥。

（3）焊接切割性能好，物理机械性能好。

（4）光学性。漆膜的光泽应是平光或无关。太光泽，电焊作业时产生反光。颜色也不能太深，以免电焊时不易观察。

（5）配套性。一般车间底漆均能与防锈底漆配套。当在确定涂装配套方案时，根据涂料性能，适当选择某种车间底漆，或根据用户的特殊要求及船厂生产实际进行选择。

（6）耐油、耐水性能。

（7）耐阴极保护。车间底漆应与阴极保护配套。

（8）施工性能好。涂刷、喷涂性能好，施工性能稳定，施工方便。

（9）电焊、气焊、切割时产生的烟雾对人体无毒害，或产生有毒有害物质不超过国家卫生标准规定的最高允许浓度。

1.3 车间底漆的特殊性能

（1）不影响电焊、气焊、切割的质量，也不影响它们的速度或者影响很小。

（2）不影响钢材的机械物理性能。

（3）电焊、气焊、切割时产生的气体对人体无害，或者放出的有毒有害物质符合国家卫生指标，即最高允许浓度。

（4）作为建造船舶的钢板预处理底漆应得到船舶检验部门的认可。

车间底漆应适应钢板预处理流水线的工艺生产：

当钢板表面的除锈等级达到 Sa 2.5 级以上时，车间底漆的涂层才会达到应有的防腐性能。

当钢板表面的粗糙度Ra为 45～70 μm时，车间底漆才能具有良好的附着力。因为表面粗糙度过高，车间底漆不能完全遮盖，致使钢板的波峰处很快出现锈蚀。粗糙度过低，又会影响车间底漆的附着力。

当钢板表面的预热温度在 35～40℃ 时，干燥的钢板表面可以加快车间底漆的干燥速度，不影响流水线作业。

总之，车间底漆必须具备快干性，在 2 ～3 min内干燥。在钢板传运的过程中，下滚道的涂层不会破坏；当电磁吊车起吊时，涂膜不受损害。

一般含锌底漆，干膜厚度不超过 20 μm，不含锌的车间底漆，干膜厚度不超过 25 μm。

几种主要的国产车间底漆性能见表 2.4.5-1。

表 2.4.5-1 主要的国产车间底漆性能

车间底漆品种	701	702	703	704	缩醛车间底漆
车间底漆类型	无锌底漆	有机锌底漆	无锌环氧铁红	无机硅酸锌	磷化底漆
组　分	单组分	环氧树脂 锌　粉 聚酰胺固化剂	环氧树脂液 （含氧化铁红的） 聚酰胺固化剂	硅酸烷基酯 锌粉	聚乙烯缩丁醛＋酚醛＋少量铬酸锌磷化液
溶剂/稀释剂	醋酸乙酯/甲苯、丙酮	酯类、酮类/二甲苯、丁醇	异丙醇＋乙醇/异丙醇＋乙醇	异丙醇＋乙醇/异丙醇＋少量乙醚	乙醇/丁醇＋乙醇
干膜厚度(μm)	15～25	15～20	15～25	15～20	15～25
防腐性能	尚　好	很　好	好	很　好	尚　好

续上表

车间底漆品种	701	702	703	704	缩醛车间底漆
车间底漆类型	无锌底漆	有机锌底漆	无锌环氧铁红	无机硅酸锌	磷化底漆
机械性能	好	好	很　好	极　好	好
焊烟对健康的危害	轻　微	吸入多时产生“锌发热”症状	轻　微	吸入多时产生“锌发热”症状	轻　微
再涂性	好	要去除产生的锌盐	防止硬度高、光洁	要去除产生的锌盐	好
耐阴极保护	好	好	好	好	不够适应
干燥机理	物理干燥	化学干燥	化学干燥	化学干燥	化学干燥

1.4 钢板预处理流水线工艺

钢板预处理流水线工艺流程如下：

1)流水线工艺性能：

预处理钢板规格：

钢板长度　$L=1000\sim12000$ mm

钢板宽度　$B=1500\sim3000$ mm

钢板厚度　$\delta=6\sim32$ mm

钢板材料屈服强度 $\delta_5=240\sim360$ N/mm²

2)钢板预处理质量指标：

在矫平次数为 1 ~ 3 次的情况下，钢板纵向平面度误差小于 1.5 mm/m；

当钢板前进速度为 3 m/min 时，A 级钢板除锈质量不低于 $Sa2\frac{1}{2}$ 级；

当钢板前进速度为 2.5 m/min 时，B 级钢板除锈质量不低于 $Sa2\frac{1}{2}$ 级；

当钢丸直径为约 Φ1 mm 时，除锈后的钢板表面粗糙度小于 70 μm。

2 饮水舱漆

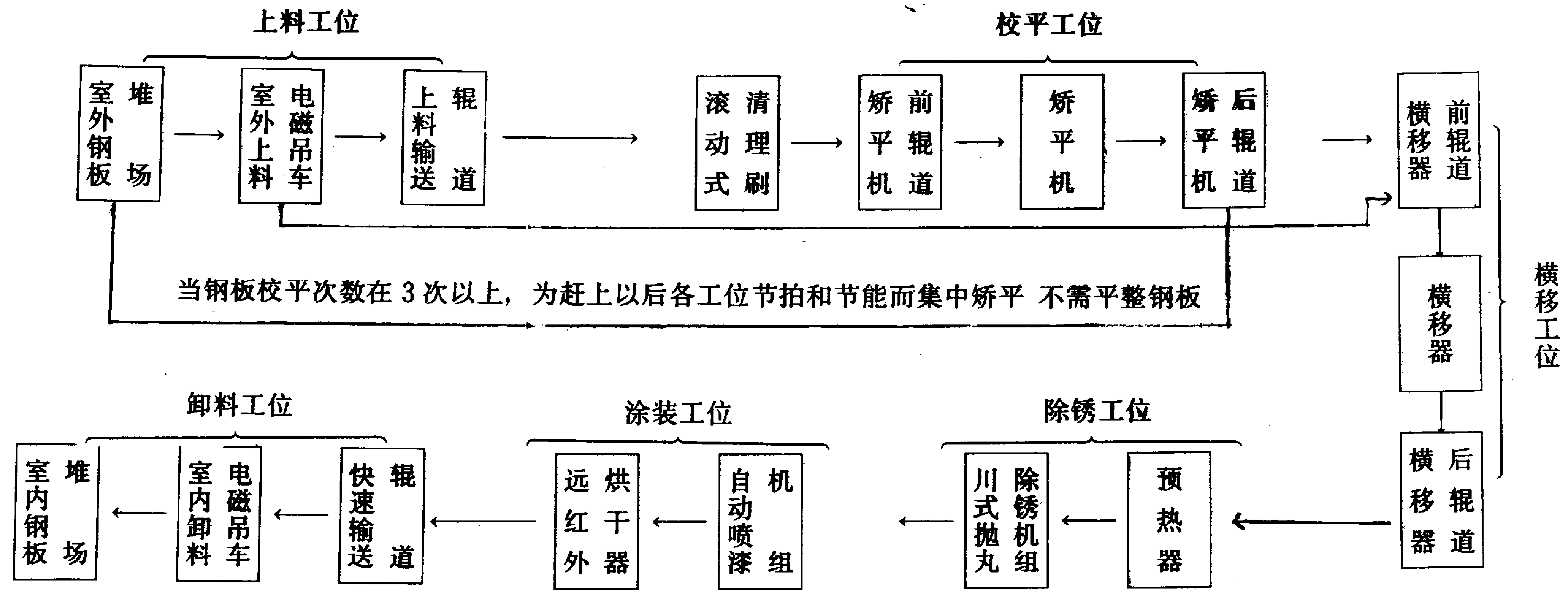
饮水舱涂料除应有良好的附着力、机械性能、耐水、耐油性能等，不影响水质，漆膜清洁，无毒。必须符合饮水卫生标准，得到国家卫生部门的认可。

2.1 饮水舱漆种类

（1）聚二乙烯乙炔饮水舱漆，因施工气味太大，目前已不用。饮水舱刷水泥浆也早被淘汰。

（2）漆酚饮水舱漆是由漆膜清漆、铝粉及溶剂组成，其中漆膜具有耐久性、耐磨性、耐油性、耐溶剂性、耐水性等优点，与钢板的结合力牢固，但施工时，对敏感的人体产生过敏性，主要皮肤过敏。但对人体内部无毒害。国内漆酚类的饮水舱涂料已经毒性试验，取得卫生部门的认可，可用于饮水舱涂料。漆酚饮水舱涂料可以直接涂复在除锈质量达 $Sa2.5$ 级钢板上，亦可与车间底漆配套使用。涂装 3 ~ 4 道，漆膜厚度可达 150~200 μm。

（3）无溶剂环氧酮亚胺饮水舱涂料：该涂料是由低分子环氧，活性稀释剂，液态酮亚胺为固化剂及防锈颜料等组成。具有良好的耐水性、耐油性、耐化学性等。施工时气味少，毒


上料工位
室外钢板堆场
室外上料电磁吊车
上料输送辊道
校平工位
滚动式清理刷
矫平机前辊道
矫平机
矫平机后辊道
横移工位
横移器前辊道
横移器
横移器后辊道
当钢板校平次数在 3 次以上，为赶上以后各工位节拍和节能而集中矫平 不需平整钢板
除锈工位
预热器
川式抛丸除锈机组
涂装工位
自动喷漆机组
远红外烘干器
卸料工位
快速输送辊道
室内卸料电磁吊车
室内钢板堆场

性低，对水质无污染作用，符合国家卫生指标。但固化时间长，需在 15℃ 以上施工，否则干燥太慢。该饮水舱涂料适宜用于有限空间的涂装。该涂料可直接涂装在 $Sa2.5$ 级钢板上，也可与环氧锌底漆配套。膜厚可达 200 μm以上，可获得很好保护效果。

（4）纯环氧饮水舱漆：该涂料由环氧、环氧胺加成物，防锈颜料，触变剂等组成，具有优异的耐水性、耐油性，防锈性能，对水质无污染作用，符合国家卫生指标。在 5℃ 以上的气温条件下施工。为防止漏涂，同一品种可分两色涂装，二道涂层，膜厚可达 250 μm左右。纯环氧涂料目前为国内外常用的饮水舱涂料

2.2 对饮水舱漆的要求

（1）饮水舱漆应具有良好的附着力、耐水性和防锈性能。

（2）饮水舱漆对水质无污染作用，对人体健康无影响。

（3）饮水舱漆的涂层必须能耐消毒用的盐类或漂白粉的侵蚀。

（4）饮水舱漆的毒性，须经过毒性分析，应附合规定的国家卫生指标，并获国家卫生部门的认可。

2.3 饮水舱漆的施工及验收

对涂装的钢板表面均需除锈达到除锈等级 $Sa2.5$ 以上。可以直接涂装，亦可选择适当的车间底漆配套涂装，控制漆膜厚度，达到应涂覆的漆膜厚度。

如发现饮水舱内湿度高至有水珠凝结时，要采取措施待干燥后再进行涂装，以防止结露现象。

防止舱内难以喷涂的部位，出现流挂和漏涂等现象。在全面喷涂之前实现预涂装（手工涂刷），然后再进行喷涂。

应加强舱内涂装作业的安全措施。该部位的涂装按 Ⅰ 级危险度的船舶涂装作业规定，进行涂装安全技术管理。

饮水舱漆施工完毕，待漆膜干燥一星期后，必须先用淡水至少浸泡三次，每次两天以上，待漆膜洗净经水质检验合格后排空，再按产品技术说明书上的要求，进行卫生处理后，再放饮用水。

3 防污漆

由于海洋生物附着于船底，使船底产生了污垢。污垢使船底增加了粗糙度，降低了船舶的航速，增加了燃料的消耗。

为了防止海水介质对船底的腐蚀，为了保持船底光滑，防止海洋生物附着、污损，并毒死海生物，特在船底涂上一层防污涂料。船底防污漆是防止海洋附着生物污损，保持船底光洁的一种专用涂料。

3.1 防污漆的组成

防污漆是由毒料，渗出助剂、基料、颜料和助剂等组成。一般毒料是指氧化亚铜或有机铅或有机锡化合物等；基料是指可溶性的松香或松香酸钙为主，有机锡高聚物既是毒料又是基料。成膜物质常规型的以油性防污漆料，铜皂及沥青等为基料。高性能防污漆以氯化橡胶，氯醋三元共聚体，丙烯酸为基料。

颜料和填充料能改善漆膜机械性能，调节毒料渗出率的作用。最常用的颜料为ZnO。接触型防污漆中以部份ZnO代替Cu_2O，而不会降低防污效果。滑石粉或重晶石粉作为防污漆中的填充料。

防污漆的溶剂主要取决于所用树脂的品种。常用的为200号煤焦溶剂，主要是三甲苯、四甲苯等。对沥青、松香等有着良好溶解性能。其他常用溶剂有二甲苯、环己酮等。

防污漆中的助剂主要有起着增厚作用的触变剂，起稳定作用的稳定剂以及防沉剂等。

3.2 防污漆的机理

含有氧化亚铜、有机锡等毒料的防污漆，漆膜与海水接触后，毒料以Cu^{2+}或有机锡分子的形式逐渐向海水溶解，在防污漆表面形成二层厚度约十几微米的有毒溶液的“薄层”。靠毒层区内的毒料发生作用排斥或杀伤海生物的幼虫和胞子，以达到防止污损的作用。

“毒层”内的毒料由于扩散和涡流作用而不断流失，漆膜内的毒料持续不断渗出，以补充流失的毒料并保持“薄层”内的毒料浓度。并以一定的速度向海水释放出毒料，亦称防污漆的渗出率，单位为$\mu g/(cm^2 \cdot d)$。防污漆的寿命，即性能好的防污漆应有平稳而稍高于临界渗出率的渗毒速度。所谓临界渗出速度是防止海洋附着生物污损所要求的最低限速的渗出率。

3.3 防污漆的性能

防污漆的主要特性是防止海生物的附着，防止船舶浸入海水部位的污损，并具有一定的防污期效。一般短期效为一年左右，长期效为2～4年。

(1)在一定的时间内防止海洋生物附着效能。

(2)漆膜内的毒料能逐步向海水里渗出。

(3)漆膜具有一定的透水性，以保持毒料连续渗出。

(4)与防锈漆有良好的层间附着力，层与层之间要稍能互溶。

(5)防污漆膜有良好的耐水冲击性，长期浸泡海水中不起泡，不脱落。

3.4 防污漆的分类

根据防污漆的结构及毒料渗出的方式，大致可分为溶解型、接触型和自抛光型。

1)溶解型防污漆　目前，国内广泛使用溶解型防污漆。溶解型防污漆由松香、沥青或油性基料、Cu_2O、DDT等组成。毒料与基料在海水里同时溶解扩散，漆膜慢慢地溶解、消耗，不断露出新鲜面，使内部的毒料与海水接触而溶解。溶解型防污漆的防污性一般为8～10个月。而我国目前使用的溶解型沥青防污漆，因配方设计合理，防污能力可达1～2年。溶解型防污漆配方见表2.4.5-2和表2.4.5-3。

表2.4.5-2　典型溶解型防污漆配方举例

原材料	重量(%)	原材料	重量(%)
Cu_2O	42.5	煤焦沥青	8.0
ZnO	23.1	松香	适量
氧化铁红	8.0	溶剂	适量
滑石粉	8.0		

表 2.4.5-3 **溶解型有机锡防污漆配方举例**

原 材 料	重量（%）	原 材 料	重量（%）
三丁基氧化锡（TBTO）	10.10	松香	6.75
钛白粉	13.25	膨通 27（Bentone 27）	1.53
滑石粉	8.84	甲基异丁基酮	适量
氯腊三元共聚体（VAGH）	7.54	甲苯	适量
磷酸三甲酯	1.14		

2)接触型防污漆　接触型防污漆漆膜内含有大量的毒料，每个毒料颗粒与其他松香等可溶物相互接触。漆膜内毒料渗出后，在残留漆膜内形成孔隙或通道，使里面的毒料颗粒能与海水接触，毒料连续不断地向海水渗出，以达到污损海生物的目的。

接触型防污漆以较好的机械强度氯醋三元共聚体或氯化橡胶、丙烯酸树脂等为基料，加上与基料相应的增塑剂如磷酸三甲酚酯或氯化石蜡等，渗出剂松香或松香酸钙，高含量 Cu_2O 及少量辅助毒料如 DDT，有机锡等成分组成乙烯型防污漆及丙烯酸厚浆防污漆即为接触型防污漆。防污有效期可达 3 年以上。接触型防污漆配方如表 2.4.5-4。

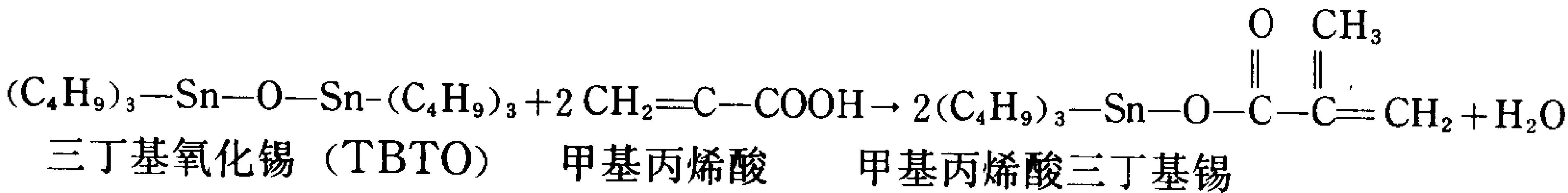
表 2.4.5-4 **典型接触型防污漆配方举例**

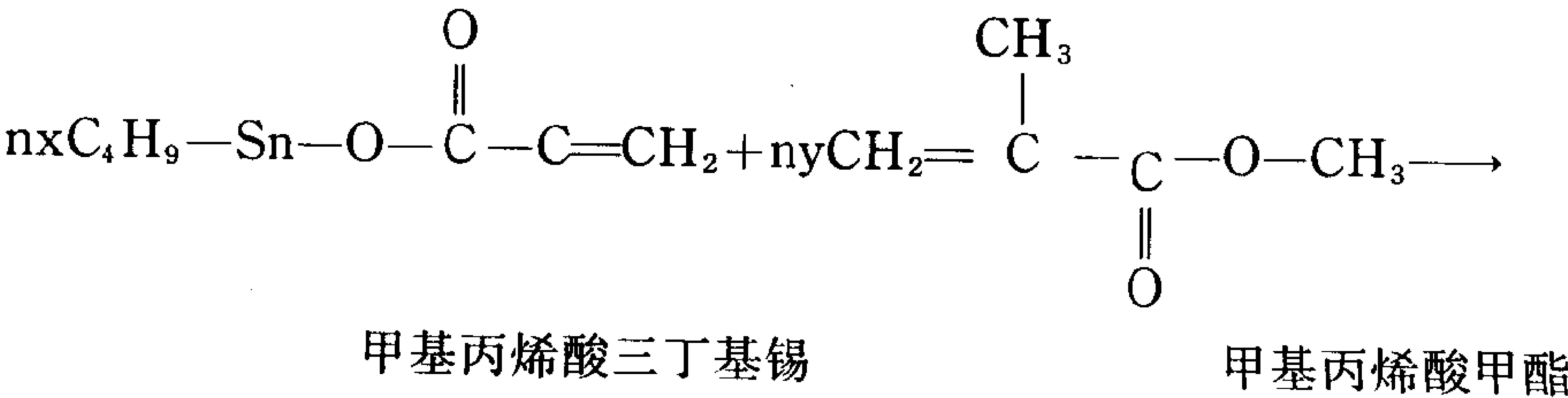
原 材 料	重量（%）	原 材 料	重量（%）
Cu_2O	70.2	甲基异丁基酮	8.1
氯腊三元共聚体	2.7	二甲苯	5.6
松 香	10.5	膨通 34（Bentone 34）	0.5
磷酸三甲酚酯	2.4	乙醇	0.15

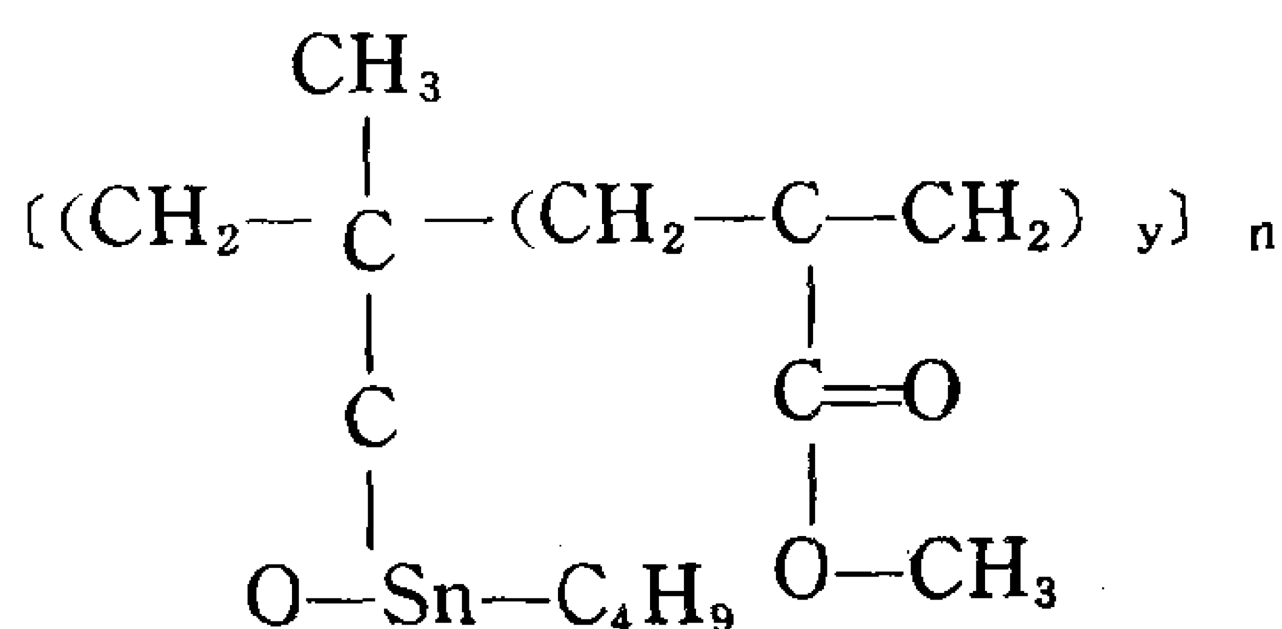
3)SPC 自抛光型防污漆　SPC 自抛光防污漆料都具有树脂中的羟基（—COOH）与有机锡化合物结合成化学键的结构。当涂层表面与海水接触时，由于水解作用使酯键断开，在毒料渗出的同时，水解的树脂也在水中溶解。涂膜在水流反复的冲刷下，表面逐渐趋向平滑，起到自抛光作用。

自抛光防污漆由有机锡高聚物为基料，以及毒料、颜料、阻滞剂等组成。

有机锡高聚物由甲基丙烯酸、三丁基氧化物（TBTO）及丙烯酸甲酯反应制得。







有机锡高聚物

自抛光防污漆是一种既能防止海生物污损又能控制船体粗糙度的新型防污漆。因此与一般的防污漆不同。SPC 防污漆的漆膜表面粗糙度与刚涂装时的表面粗糙度相比变化不大。由于自抛光防污涂料能保持最高的平滑性，因此降低了涂膜与水流之间的摩擦力，漆膜使用到最后，仍有防污效果，具有长效防污漆的特性。

SPC 自抛光防污漆优点：

(1)防污 寿命长，干膜 300 μm时，有效期为 3 年，每月消耗漆膜 8 ～10 μm。

(2)在航行中，漆膜受到喘流的影响，自身有抛光作用，可减少船底的粗糙度和航行阻力，能节省大量燃料。

(3)对人体毒性少，不污染海水。

(4)可在 SPC 老漆膜上直接涂装新的 SPC 防污漆不必先涂封闭层。

(5)具有干湿交替性能，除作为船底防污漆外，还可以作为水线防污漆。

SPC 自抛光防污漆具有优异的防锈性能，及特殊的自抛光性能。使用 SPC 自抛光防污漆船航行 2 年就可以节省 8 %～15%的燃料，航速增加 1 %～ 6 %，具有较好的经济效益，是较为满意的防污体系。

4 防火涂料

用来阻止易燃物表面着火，或在易燃物表面着火的情况下，阻止火焰沿着表面蔓延，降低燃烧温度，并有一定的绝缘功能的涂料称作防火涂料，又称阻燃涂料，亦可称防延燃涂料。防火涂料主要应用于船舶的居住舱室内的木材、软板、纸板、纤维板等易燃材料表面，能防止这些材料着火，或在着火的初期阻遏火焰，达到利于灭火的目的。防火涂料涂覆在钢结构表面上，遇火能起隔热作用，使钢结构的温度尽可能低，不致很快受热变形，以保护钢结构的强度。

4.1 防火涂料的组成

防火涂料由难以燃烧或阻燃及自熄的粘接剂为基料，及含有耐高温颜料，阻燃的颜料组成。一般含氯的粘接剂、如氯化橡胶、颜料为氧化锑、氧化铜等。所有的防火涂料，效果最好的是发泡型。因为它能在受热的涂层上形成一层厚的碳组成的泡沫隔热层，这一隔热层可以经受长时间的高温。

4.2 防火涂料的性能

防火涂料涂复于材料的表面，具有较好的防火性能。

无机防火涂料组份中采用硅酸钠液、海藻酸钠液、硫酸钡、硼酸钠、石棉、云母、金属锌粉、氧化铁红等材料。防火性能较好，原料易得，制作简便，成本低廉。但附着力、装饰性较差，硅酸钠等材料易水解，防潮防水性能不良。同时涂膜易老化，脱落。只能涂覆于仓库的内墙，混凝土等装饰不强的部位表面上，难以广泛施工。

有机防火涂料可分为非膨胀型和膨胀型二类。

非膨胀型防火涂料组成中的树脂粘合剂，常用的有酚醛树脂、氨基树脂及氯化橡胶、过氯乙烯、氯化醇酸等树脂。它们受热时，分解出大量的氯气和氯化氢气体，以增加阻燃能力。以四溴双酚 A 代替双酚 A 制成的环氧树脂，用四溴苯二甲酸酐制造的醇酸树脂、乙烯树脂中加入三磷酸酯，酚醛中加五溴酚，它们在受热时分解出 HBr，使火焰熄灭。防火涂料中的颜料、填料和阻燃添加剂，常用的含有铵根，氯根，碳酸根的化合物。它们遇火受热分解时，产生阻燃的氨、氯、二氧化碳气体等。这些非膨胀型涂料，由于未能形成绝热泡沫层，其阻燃效果有局限性。

膨胀型防火涂料可选用聚磷酸铵、磷酸三聚氰胺、三氯磷酸脂、尿素、氯化联苯、三聚氰胺、甲醛树脂，磷酸三氢胺等材料。碳化剂采用含碳有机物，如季戊四醇、聚酰胺树脂、淀粉等。其作用是提供“碳架”作为发泡的物质基础。常用的六亚甲基四胺、磷酸氢二胺等的喷气剂遇火受热分解时放出不燃气体，吹起碳质层，促使形成多孔泡沫。

以上各组分配比合理，各起作用。不仅形成防火隔热层，同时阻挡大量氧气，防止燃烧。

目前研制的 FR-A 醇酸膨胀防火涂料，具有优异的热性和低传热性能。该防火涂料主要选用了聚磷酸铵作为阻燃剂，与合适的发泡剂联合使用。所形成的发泡层致密，不易碎裂，防火性能好，达到了一级防火等级。

4.3 防火涂料的应用及施工

1)防火涂料的应用　船舶于海洋水域中航行。与陆地相比，消防与安全十分重要。因此防火涂料广泛应用于船舶的机舱、厨房。以及危险物品贮藏室、需加强防火的舱室、木质结构等部位。目前广泛使用的防火漆有 G 60-1、G 60-2、F 60-1、FR-A 型以及氯化橡胶防火漆。

2)防火涂料的施工　防火涂料配套分底漆、面漆两种，底漆如 G 60-2 过氯乙烯防火漆、F 60-1 各色酚醛防火漆等。

(1)防火涂料的固体含量 50%时，刷底漆、面漆各二道。

对膨胀型涂料的用量为常用涂料的 3 ~ 4 倍，漆膜厚度约 130 μm。遇火受热发泡，其厚度高达 1.3~2.5 cm。

(2)以涂刷为主。喷涂有时会出现涂料中的化学物质结块现象，不利于涂层的完整性和阻燃性。可不涂底漆，连续涂四道防火面漆。

(3)钢板表面去油除锈等前处理，亦按一般施工方法，但防火漆不具有良好的防锈性能。为此，须预涂防火底漆或涂刷醇酸、环氧、红丹等防锈底漆。

(4)每道涂刷间隔时间:

0 ~10℃　　48 h;

10~25℃　　24 h;

25℃以上　　20 h。

以上仅为涂刷参考间隔时间。总之，以实际漆膜干燥时间为准。

（5）防火漆内不能掺加其它涂料或材料。施工时，若粘度变稠，可酌情加二甲基200号溶剂汽油等相适应的溶剂，水性防火涂料变厚时，加水搅拌。

（6）根据防火涂料组成的材料品种及其性能，施工时，采取相应的劳动保护及劳动卫生措施。

5　甲板防滑漆

甲板防滑漆用于船舶甲板部位，如舷梯、楼梯与平台甲板等。防滑漆涂覆于甲板，使甲板表面粗糙。即使甲板被水及油污染，也会因防滑漆中的砂、石英砂或金刚砂等粗糙材料，致使表面粗糙，仍能保持其防滑性能。

甲板防滑漆分环氧型、醇酸及过氯乙烯等不同的类型。它与一般的甲板漆不同的是除了含有耐磨性好的颜料和填充料外，在施工时，需外加黄砂、石英砂、或橡胶颗粒、金刚砂等，使涂覆的表面粗糙而防止滑跌。

5.1　甲板防滑涂料的组成

甲板防滑涂料是用醇酸树脂或过氯乙烯树脂，或氯化橡胶或环氧树脂，或聚氨酯树脂等作为基料，并加入防锈耐磨颜料和具有粗糙性黄砂等原料配制而成的。甲板防滑涂料虽能以各种粘接剂作为基料，但最好采用环氧树脂或聚氨酯树脂等。

用天然乳胶或丁苯乳胶或氯丁乳胶，掺入水泥及少量其它物质等制成的甲板敷料，完全可起到更佳的防滑涂料的作用。

5.2　甲板防滑涂料的种类

甲板防滑漆的漆膜具有坚硬、粗糙、耐磨的特点，遇水及油污时具有防滑性。

1）醇酸甲板防滑漆　该漆有较好的附着力、耐候性和耐水性，但干燥较慢，漆膜不够坚韧、耐久，不耐海水等。但由于其施工方便、价格较低，目前为国内使用最多的一种甲板防滑漆。

2）环氧甲板防滑漆　该漆漆膜坚硬耐磨、耐水、耐油、耐化学药品性能好，使用期限长。但双组份调合后需在10℃以下，固化很慢，因此冬天不易施工。施工受温度条件的限制。

3）氯化橡胶甲板防滑漆　漆膜比醇酸甲板防滑漆干性快，漆膜硬度高，耐磨性好，使用期限长。

5.3　甲板防滑涂料施工

1）甲板防滑漆施工的技术要求，见表2.4.5-5。

表2.4.5-5　**甲板防滑漆的施工技术要求**

涂料类型	涂装道数	干膜厚度	涂装间隔 25℃（h）	配套涂料	涂膜总厚度（μm）
醇酸系	1～3（刮涂）	1～2mm 包括防滑材料	36	醇酸铁红底漆	
环氧系	3	80～200μm	24	醇酸保养底漆或环氧富锌底漆	200～220
氯化橡胶系					

2）甲板防滑漆施工要点　醇酸防滑漆的一种施工方法是按漆基与防滑材料配合比来进行调配。刮涂 1 ～ 3 层，膜厚为 1 ～2 mm。另一种方法漆膜未干之前，撒上黄砂，干后扫除未粘结的黄砂，再涂一道未加入水泥的防滑漆。

环氧防滑漆的一种施工方法是先涂防滑漆一道，漆膜未干时撒上金刚砂或橡胶粘。干燥后，扫除粘结的防滑材料，然后再涂一道防滑漆。另一种施工方法是使用橡胶粘作为防滑材料时，按规定量调入防滑漆内，用刮刀刮涂于甲板上。环氧防滑漆按规定的双组分配比量进行调配，不宜在 10℃ 以下使用。

第5篇　船舶水处理

第1章　概　　述

船舶的动力设备和生活设施都离不开水。船舶用水的来源为舷外水（海水、江水、河水、湖水）、自来水和淡化水。这些水在不同程度上受到各种各样的污染。本篇介绍各种水被污染的情况及其危害，以及为消除这些危害而进行处理的各种方法。

1　水中的杂质

水中的杂质按颗粒大小的不同可分成悬浮物、胶体和溶解物三类。此外，水中还含有溶解气体、各种生物和细菌。

1）悬浮物：这些是颗粒直径约在 10^{-4}mm 以上的微粒。这类杂质在水中是不稳定的，很容易被除去。水发生浑浊现象，都是由这类杂质造成的。较轻的悬浮物浮于水面，较重的悬浮物沉入水中。

2）胶体：其颗粒直径与悬浮物基本相同，是许多分子和离子的集合体。这些微粒的表面有明显的活性，因而吸附了许多离子而带电。带有同性电荷的同类胶体互相排斥，它们在水中不能互相结合，故保持胶体颗粒状态。

表 2.5.1-1　　溶解于水中的各种离子

类别	阳 离 子	阴 离 子	浓　度
I	钠离子 Na^+ 钾离子 K^+ 镁离子 Mg^{2+} 钙离子 Ca^{2+}	重碳酸根 HCO_3^- 氯离子 Cl^- 硅酸氢根 $HSiO_3^-$ 硫酸根 SO_4^{2-}	自几个至几万 ppm
II	铵离子 NH_4^+ 铁离子 Fe^{2+} 锰离子 Mn^{2+}	氟离子 F^- 硝酸根 NO_3^- 碳酸根 CO_3^{2-}	自十分之几至几个ppm
III	铜离子 Cu^{2+} 锌离子 Zn^{2+} 镍离子 Ni^{2+} 钴离子 CO^{2+} 铝离子 Al^{3+}	硫氢根 HS^- 硼酸根 BO_2^- 亚硝酸根 NO_2^- 溴离子 Br^{2-} 碘离子 I^- 磷酸氢根 HPO_4^{2-}	小于 1/10 ppm

3）溶解物：溶解在水中的物质大都以离子状态存在，其颗粒大小均小于上述悬浮物和胶体。

常遇到的各种离子见表 2.5.1-1，其中第 I 类最常见。

4）溶解气体：水中常有的溶解气体是氧和二氧化碳，有时还有硫化氢、二氧化硫和氨等。氧是水中的主要溶解气体，大气中的氧在水中的溶解度见表 2.5.1-2。

在自然界中，地下水含氧量较少。地面水含氧量较大，其溶解氧的含量，如表 2.5.1-2 所示。水的含氧量随温度的变化而变，也随大气压力的变化而变。如水中含有的有机物，与氧起化学反应，则会改变水中溶解氧的含量。

地下水中的二氧化碳含量有时很高，地面水中的二氧化碳含量不超过 20～30 ppm。

表 2.5.1-2　　　　大气压下氧在水中的溶解度

温度（℃）	O_2(ppm)	温度（℃）	O_2(ppm)	温度（℃）	O_2(ppm)	温度（℃）	O_2(ppm)
0	14.6	9	11.6	18	9.5	60	4.8
1	14.2	10	11.3	19	9.3	70	3.9
2	13.8	11	11.0	20	9.1	80	2.9
3	13.4	12	10.8	25	8.3	90	1.6
4	13.1	13	10.5	30	7.5	100	0
5	12.8	14	10.3	35	7.0		
6	12.4	15	10.1	40	6.5		
7	12.1	16	9.9	45	6.0		
8	11.8	17	9.7	50	5.6		

5)水中还含有大量细菌、各种生物和微生物。

水中的各种杂质、溶解气体、细菌、生物和微生物含量和种类随着水源的变化而有很大的不同，如海水、江河水、自来水、淡化水就有明显的不同。因此要分别研究它们，并在有关的设备上采取相应的处理措施。

2　船舶水处理的种类

当船舶动力设备以水作为工质时,如果对水没有经过专门处理,受热后的水中杂质就会逐渐在设备中特别是在换热面上形成水垢沉淀物,从而妨碍热交换的进行。有的水中杂质还会腐蚀设备,既影响设备安全运行(严重时还会使设备损坏),也增加了能耗。当水用来作饮用水时,如不采取必要的处理措施,没有达到饮用水标准,旅客和船员的身体健康就会受到严重影响。

表 2.5.1-3 列出了船舶各种水处理的种类、目的和方法。

表 2.5.1-3　　　　船舶水处理的种类、方法和目的

种　类	方　法	目　的
海水淡化装置水处理	化学处理	防止蒸发器和蒸汽冷却器表面结水垢
蒸馏水处理	化学处理	海水淡化装置造出的蒸馏水如要作饮用水，需经杀菌消毒和硬化处理
	紫外线灯	杀菌消毒
供给水处理	化学处理	除去水中的钙、镁离子后，作柴油机冷却淡水和锅炉用水的供给水
柴油机冷却淡水处理（包括气缸套、活塞、喷油器、淡水冷却系统和其他淡水冷却系统在内）	化学处理	防止热交换面结水垢和防止腐蚀
	乳化防锈油处理	防止热交换面结水垢和防止腐蚀
	抗冻化学处理	防止天冷时冷却水冻结
锅炉水处理（包括锅炉水和凝结水系统）	化学处理	防止锅炉热交换面结水垢和防止腐蚀，防止蒸汽和冷凝水系统受到腐蚀
海水系统处理	化学处理	防止海底门和热交换器积聚海生物和防止腐蚀
	电解防污处理	防止海底门和热交换器积聚海生物和防止腐蚀
饮用水处理	净水器处理	净化江、河、湖水，使之达到饮用水标准

其中用乳化防锈油处理柴油机冷却淡水的说明，请看本卷第 3 篇第 3 章。锅炉水的化学处理及饮用水处理的说明，参阅本手册的有关章节。

第2章　海水淡化装置水处理

各种海水淡化装置都以海水为工质，让海水在大气压下或接近真空状态下受热蒸发，然后把水蒸汽冷凝为蒸馏水。大多数情况是蒸发的热源利用主机冷却淡水的热能，有些装置则用烟气余热和蒸汽作为热源。

在海水淡化装置处于正常工作状态时，所产生的蒸馏水的氯化钠含量，在最好的情况下，可以低于 2 ~ 3 ppm。把这些水用作锅炉补给水和柴油机冷却淡水，可以大大减少锅炉水处理和冷却水处理的工作量和水处理的药品使用量。以蒸馏水代替海水作卫生水，会使海水管路极大地免受腐蚀。此外，海水淡化的主要热源大多是利用主机冷却淡水的热能，不增加能耗。同时，船舶还减少了自来水的携带量，故能减少水费开支并增加装货量。

海水淡化装置进行水处理会对其它水处理产生重要影响，因此它被看作是船舶各种水处理的基础。

1　处理原理

海水中所含的主要杂质为溶解物，它们多数以离子状态存在，如表 2.5.2-1 所示。

表 2.5.2-1　海水中含有的各种离子

离子名称	符　号	海水中含量ppm	离子名称	符　号	海水中含量ppm
钠离子	Na^{+}	10500	硫酸根离子	SO_4^{2-}	2700
镁离子	Mg^{2+}	1250	重碳酸根离子	HCO_3^-	140
钙离子	Ca^{2+}	400	溴离子	Br^-	70
钾离子	K^+	350	二氧化硅	SiO_2	10
锶离子	Sr^{2+}	14	其它物质		16
氯离子	Cl^-	19000	合计		34450

由上表得知，海水中所含杂质的平均浓度为 3.445%。

海水淡化装置在工作时，蒸发器管子表面温度促使海水快速蒸发，使上述杂质析出。如果对水不进行处理，蒸发器管子表面就会积结水垢。高密度的海水沸腾飞溅会使馏出物水蒸汽和蒸汽冷却器受到污染，以致影响了蒸馏水的质量，降低了冷却器换热效率。解决这些问题的方法是往补给的海水中加入水处理剂。水处理剂含有化学聚合物，其作用是:

(1)与沉积在蒸发器管子上的结晶性的水垢结合后，改变了水垢分子结构形状，减低其在表面上的粘附力，使金属表面上初步形成的沉积固体物质与金属分开，浮游在蒸发器周围的海水中，被海水抽逐泵连续带走。

(2)消散小汽泡，防止海水飞溅，这是通过水处理剂中含有的消泡沫剂来实现的。

2　国外部分海水淡化装置水处理剂介绍

国外的一些海水淡化装置水处理剂的品种和药剂性质、药剂用量及注意事项见表 2.5.2-2。

3　投药方法

投药装置的典型系统图见图 2.5.2-1。

表 2.5.2-2　**国外部分海水淡化装置水处理剂**

<table>
<tr><td>公司名称</td><td colspan="2">德鲁船用化学品公司
Drew Ameroid Marine</td><td colspan="2">碧浪灵船用化学品公司
Perolin Marine</td><td colspan="2">马力达船用化学药品公司
Magnus Maritec Inter Inc.</td><td>加美仑化工产品公司
Gamlen Marine Division</td><td>威金公司
VECOM</td></tr>
<tr><td>药剂名称</td><td colspan="2">AMEROYAL EVAPORATOR TREATMENT</td><td colspan="2">FORMET 343</td><td colspan="2">HI-LO-VAP</td><td>GAMAVAP</td><td>QC-1</td></tr>
<tr><td>药剂性质</td><td colspan="2">淡黄色液体，稍有粘性，pH 值 13（未经稀释时），相对密度 25℃时为 1.05～1.07</td><td colspan="2">澄明液体，微有氨气味，pH 值 9（1％溶液时），相对密度 15℃时为 1.08</td><td colspan="2">清晰淡黄色液体，相对密度为 1.13，pH 值（1％溶液）为 7.5～8.0</td><td>黄色液体，相对密度 20℃时为 1.050±0.020，pH 值（1％溶液）为 6.8</td><td>淡棕色中性液体，相对密度 20℃时为 1.2，pH 值（20℃）为 7</td></tr>
<tr><td rowspan="10">药剂用量</td><td colspan="2">按生产蒸馏水，每天每吨用 30 ml，如果清除水垢，每天每吨用 60 ml</td><td colspan="2">每天处理用剂量按照盐水密度而定，可用海水密度计测试采用不同剂量</td><td colspan="2">按每天蒸馏水的产量决定采用之</td><td rowspan="10">按每天蒸馏水产量决定药剂量。每吨蒸馏水每天用 30 ml</td><td rowspan="10">按每天蒸馏水产量决定药剂量。每吨蒸馏水每天用 30 ml</td></tr>
<tr><td>蒸馏水产量(t/d)</td><td>用药量(l/d)</td><td>排出口盐水相对密度[1]</td><td>用药量(ml/d·t)</td><td>蒸馏水产量(t/d)</td><td>用药量(ml/d)</td></tr>
<tr><td>5</td><td>0.15</td><td>1.05</td><td>60</td><td>10</td><td>240</td></tr>
<tr><td>10</td><td>0.30</td><td>1.038</td><td>30</td><td>15</td><td>360</td></tr>
<tr><td>15</td><td>0.45</td><td>1.03</td><td>40</td><td>20</td><td>470</td></tr>
<tr><td>20</td><td>0.60</td><td>1.029</td><td>50</td><td>25</td><td>590</td></tr>
<tr><td>25</td><td>0.75</td><td>1.028</td><td>60</td><td>30</td><td>710</td></tr>
<tr><td>30</td><td>0.90</td><td>1.027</td><td>90</td><td>40</td><td>950</td></tr>
<tr><td>40</td><td>1.20</td><td></td><td></td><td>50</td><td>1200</td></tr>
<tr><td>50</td><td>1.50</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>注意事项</td><td colspan="2">1.对眼睛、皮肤有不适感或过敏
2.必须密封贮存在容器内工作时戴手套和护目镜
3.急救时用大量水冲洗，至少 15 min，如错吞服，服用水和醋溶液或菜油 50 ml 并送去求医</td><td colspan="2">1.远离食物，漏出物用水洗净
2.对眼睛、皮肤、呼吸器官均有刺激不可接触
3.触及后用肥皂与水洗去，如错吞服，饮多量水后求医</td><td colspan="2">不可内服</td><td>若溅入眼内，必须用水冲洗</td><td>如接触眼睛和皮肤要用水冲洗</td></tr>
</table>

① 盐水相对密度在 1.038 以上时，水垢易形成，因此用剂量大。盐水密度较低，水垢较难形成；但海水供水量和盐水排出量增加，要增加处理剂量。

投药操作的程序如下:

(1)按照海水淡化装置的蒸馏水产量，查出每天应投放的药剂量。

(2)流量指示器的单位是 ml/min, 在指示器的工作范围内任选一个数值, 例如 100 ml/min, 然后按下列公式计算。

$$100\ \text{ml/min} \times 60\ \text{min/h} \times 24\ \text{h} \div 1000$$

计算结果为 144 l。

(3)将处理的药剂倒进容积约 200 l 的贮液桶，用海水或淡水稀释到 144 l。

(4)当海水淡化装置开始工作时, 打开贮液桶的出口阀, 将流量指示器调节到预定的 100 ml/min处。由于重力和海水泵的抽吸作用，药液通过流量指示器和止回阀进入海水淡化装置的海水补给管，与海水一起进入到海水淡化装置中。处理是连续进行的。

(5)每 24 h 重复进行一次。

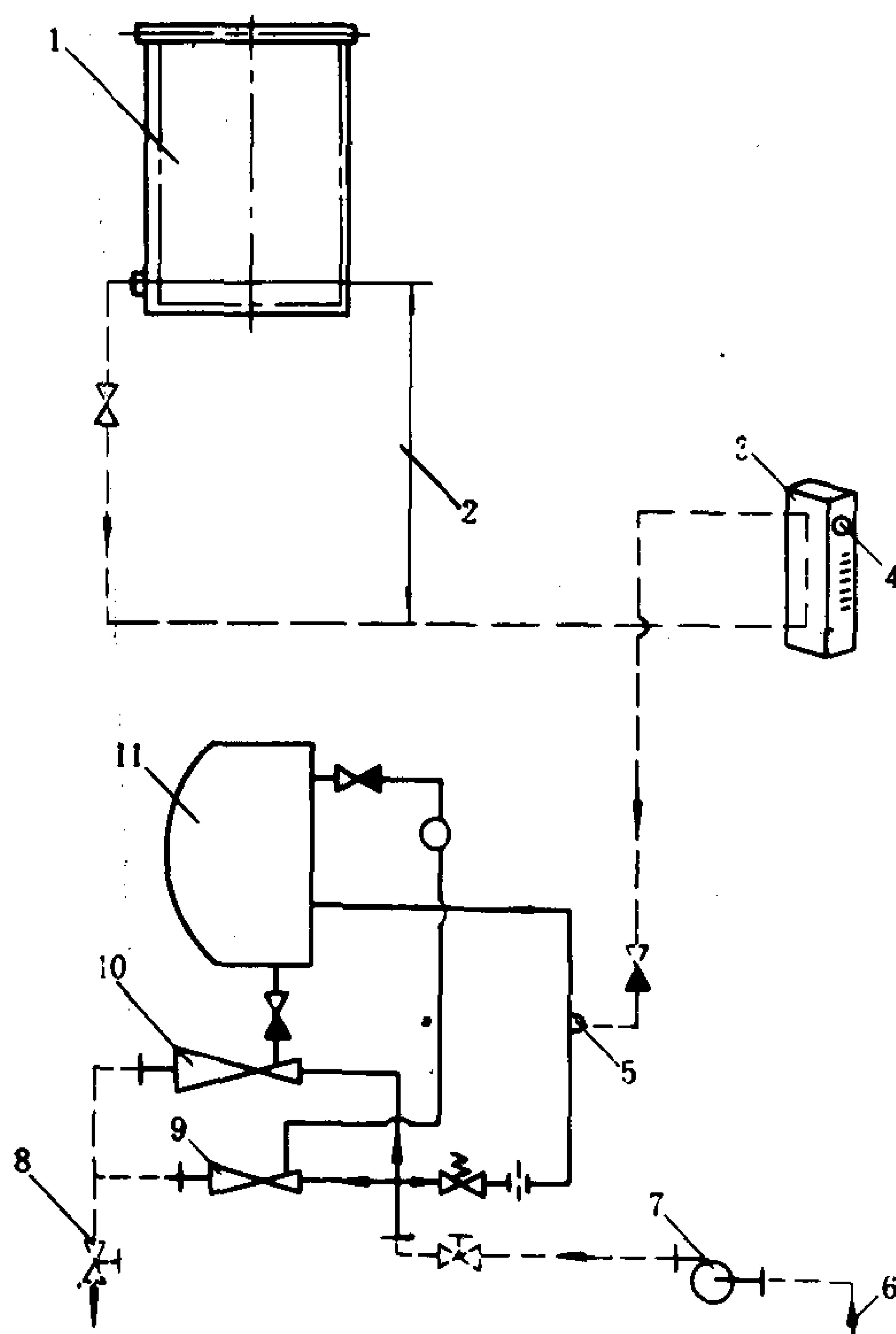


图 2.5.2-1 海水淡化装置水处理投药典型系统图

1-贮液桶; 2-至少有 4 m 距离; 3-流量指示器; 4-流量调节旋钮; 5-药剂进口; 6-海水进口; 7-海水抽逐泵; 8-海水排出舷外; 9-真空抽逐器; 10-盐水抽逐器; 11-海水淡化装置

第 3 章　蒸馏水处理

海水淡化装置产生的蒸馏水，要经过处理才可以饮用。

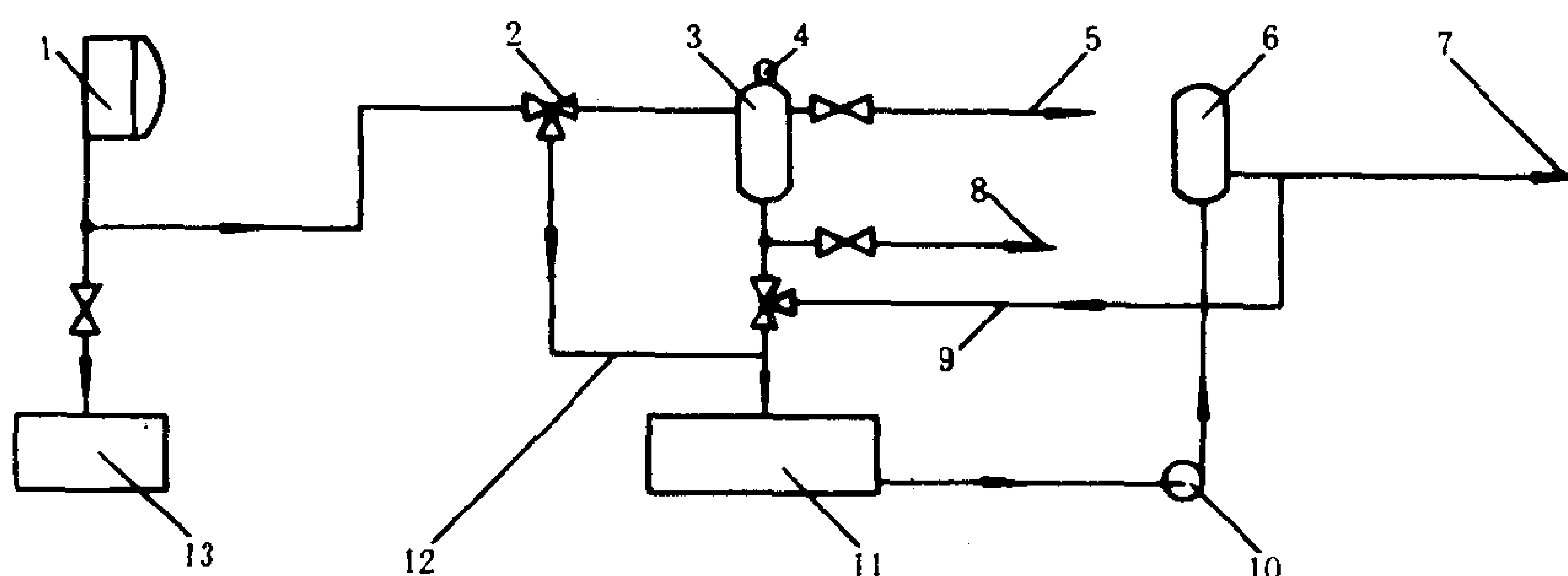


图 2.5-3-1　蒸馏水处理系统（一）

1-海水淡化装置；2-三通阀；3-硬化过滤器；4-自动透气阀；5-放入舱底；6-压力水柜；7-饮用水通向各使用点；8-放入舱底；9-反向冲洗管；10-水泵；11-贮水舱；12-旁通管；13-炉水舱

1　处理方法

下面是船舶蒸馏水处理的几种方法：

（1）如图 2.5.3-1 所示，先让海水淡化装置产生的蒸馏水通过硬化过滤器。由于硬化过滤器中有石英砂和提高 pH值的物质，可使从过滤器出来的水就具有一定的硬度和 6.5～8.5 之间的 pH 值，然后将其引入贮存水舱中，再泵至压力水柜，以供饮用。

（2）海水淡化装置产生的蒸馏水引入贮水舱，同时用计量泵往贮水舱连续定量地投放液体次氯酸钠（NaClO），进行杀菌消毒，让水中保持着 1.0～1.5 ppm 的氯气浓度。水泵将贮水舱的水泵至压力水柜，然后，让水经过除氯过滤器。除氯过滤器中含有石英砂和活性炭，水从过滤器出来就有一定的硬度，原来溶解在水中的有害气体也被吸引了，已可供饮用。这种处理系统如图 2.5.3-2 所示。

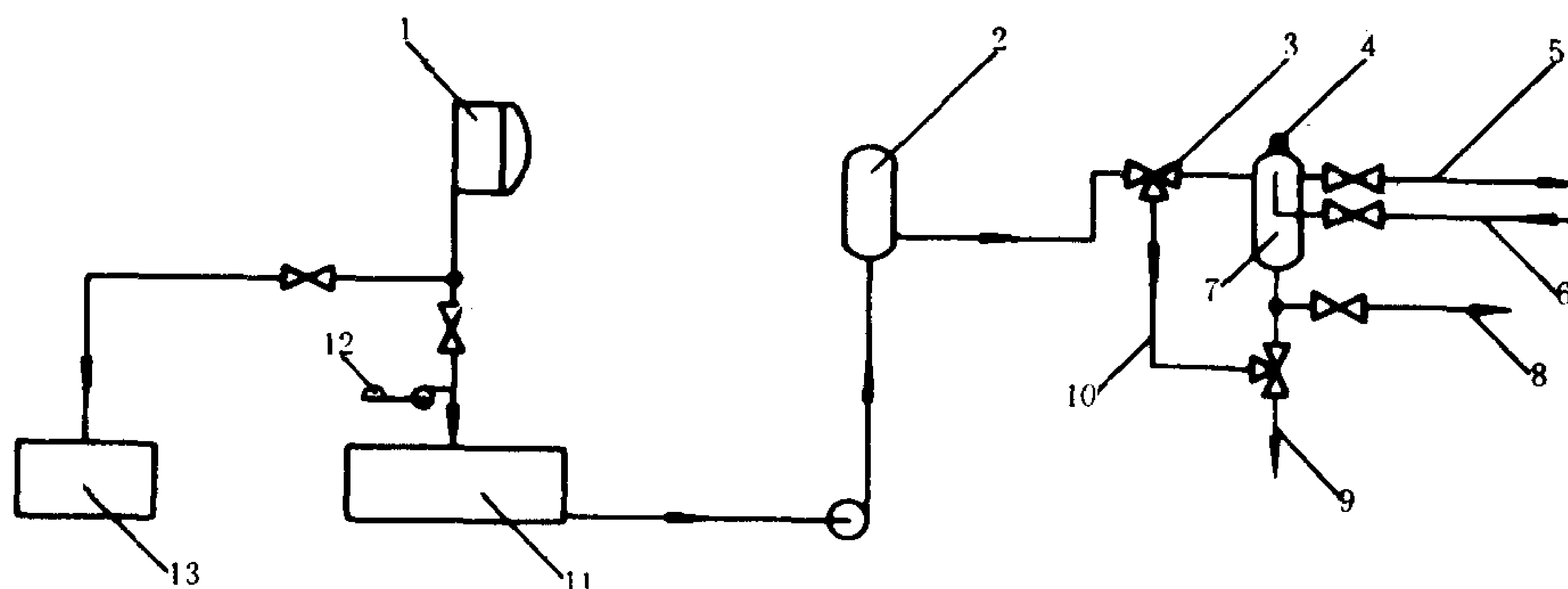


图 2.5.3-2　蒸馏水处理系统（二）

1-海水淡化装置；2-压力水柜；3-三通阀；4-自动透气阀；5-放入舱底；6-加热蒸汽；7-除氯过滤器；8-放入舱底；9-饮用水通向各使用点；10-反向冲洗管和旁通阀；11-贮水舱；12-投次氯酸钠装置；13-炉水舱

如果这套处理系统中没有安装除氯过滤器，则投放液体次氯酸钠的数量要减少，水中的氯浓度应保持在 0.5～0.75 ppm。

（3）处理系统中设置了硬化过滤器、投次氯酸钠装置和除氯过滤器，使饮用水的质量更高。这种处理系统如图 2.5.3-3 所示。

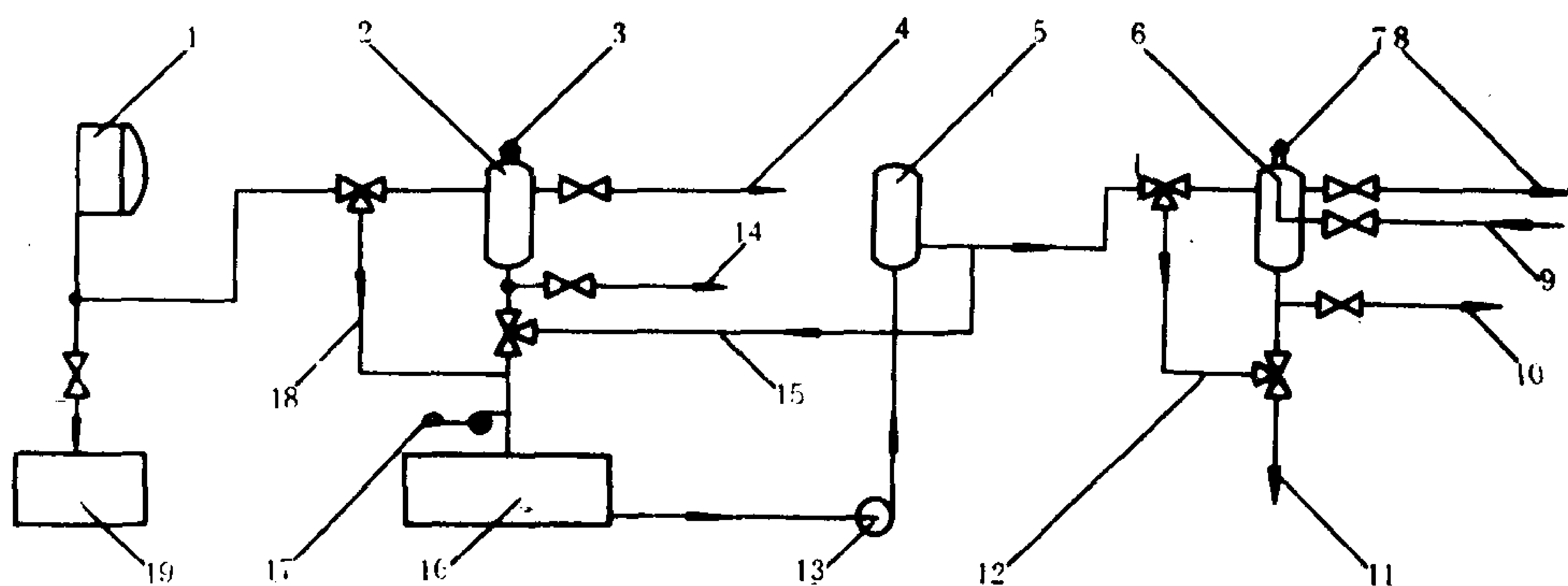


图 2.5.3-3　蒸馏水处理系统（三）

1-海水淡化装置；2-硬化过滤器；3-自动透气阀；4-放入舱底；5-压力水柜；6-除氯过滤器；7-自动透气阀；8-放入舱底；9-加热蒸汽；10-放入舱底；11-饮用水通向各使用点；12-旁通和反向冲洗管；13-水泵；14-放入舱底；15-反向冲洗管；16-贮水舱；17-投次氯酸钠装置；18-旁通管；19-炉水舱

（4）有些处理系统，在管路上装设紫外线杀菌灯，利用紫外线杀菌原理，对蒸馏水进行杀菌消毒。

2　注意事项

1)每 100L 水投放的次氯酸钠数量 W 按下式计算。

$$W=\frac{Q\times K}{1.5\times D}$$

式中：W——投放的次氯酸钠数量，g；　　K——预定的水中保持的氯的浓度，ppm；
　　Q——待处理的蒸馏水流量，L/h；　　D——投药计量泵的排量，L/h。

2)硬化过滤器出来的水必须每天检查其 pH 值。过滤器的管路中设置有反向冲洗系统，在第一次使用前要进行反向冲洗。三通阀的方向应当向上，这时水流方向为自下向上。冲洗时间约 10 min，直到出水清晰为止。过滤器这时可以正式运行。在运行中也要定期反向冲洗。根据情况一个星期一次或一个月一次。提高 pH 值的物质的性能，随水的通过量增加而变差，该物质至少一年应更换一次。在正常使用中，三通阀的方向为自上向下，水流的方向自上而下。在装置停用时，三通阀应当放在水平位置。

3)除氯过滤器的管路设置反向冲洗系统，在第一次使用前要进行反向冲洗，即把三通阀放在向上的方向，水流的方向自下而上，约 10 min后，出水清晰了，停止反向冲洗，过滤器方可投入使用，使用中，三通阀放在向下的方向，水流自上而下流动。过滤器停用时，三通阀放在水平方向。在过滤器运行一段期间后，活性炭必须作再生处理，再生处理的时间为六个月一次或一年一次，按污染情况而定。再生处理时，先将过滤器停止运行，三通阀放于水平位置。打开透气阀和泄放阀，待里面的水放走后，关上各阀，然后通入蒸汽加热 15 min，停止加热后，把三通阀放在向上的位置，进行反向冲洗，直列出水清晰为止。这样，活性炭得到再生。但经过几次再生后，活性炭终将失效，应予以换新。

第4章　供给水处理

锅炉水和柴油机冷却淡水在运行过程中都有消耗，要加以补充。所补充的水，如果不是海水淡化装置产生的，则必须根据实际情况，作适当的化学处理。

由于大、中、小船舶的条件不同，江船和海船的条件亦有别，故采取的化学处理方法也必然不同，下面简介供给水处理的一些方法。

1　江河船舶清除供给水杂质的方法

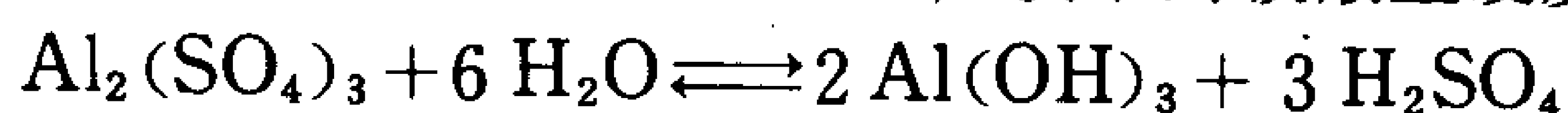
江河船舶往往直接取江河水供给锅炉和柴油机使用，对含有大量悬浮微粒和胶体物质的混浊水要预先澄清和过滤。水中存在轻悬浮物时，则难以澄清，如果用凝聚剂处理，就能迅速地完全地澄清。最有效的凝聚剂有：

硫酸铝　$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

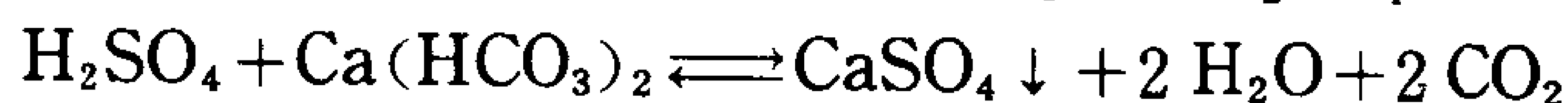
硫酸亚铁　$FeSO_4 \cdot 7H_2O$（即绿矾）

氯化铁　$FeCl_3 \cdot 6H_2O$

把凝聚剂（硫酸铝）加入到供给水的专用水舱后，硫酸铝就会水解生成氢氧化铝和硫酸。硫酸与重碳酸钙和重碳酸镁作用，使水的碳酸盐硬度沉降下来。其反应过程如下：



$$Al_2(SO_4)_3+6H_2O \rightleftharpoons 2Al(OH)_3+3H_2SO_4$$



$$H_2SO_4+Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaSO_4\downarrow+2H_2O+2CO_2$$

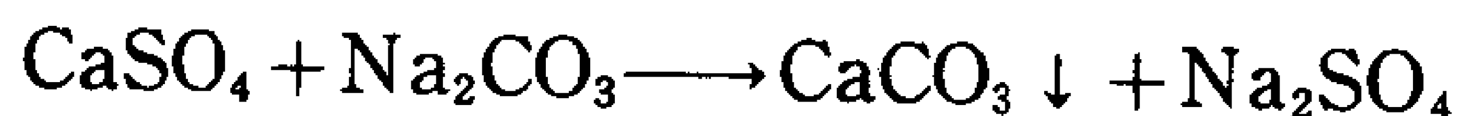
水的澄清进程与投药数量、水的pH值、水的温度、搅拌情况、悬浮物和胶体物质的特性有关。为了除去悬浮物，水的pH值应保持在4.3～5.8的范围内，当pH值达5.7～8.0时，悬浮物可完全被消除。

确切的凝聚剂用量用实验方法确定。其大致用量为每立方米待处理的供给水中加入30～120 g的硫酸铝。

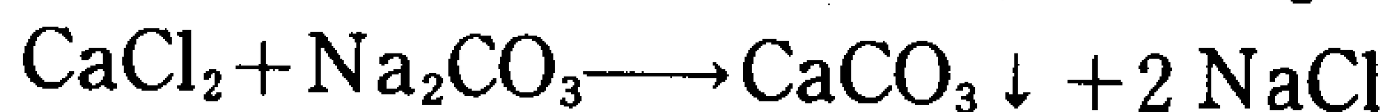
2　用氢氧化钠和碳酸钠软化锅炉供给水

对锅炉供给水分别投入氢氧化钠和碳酸钠或投入两者混合液加以软化，然后再进入锅炉使用，这样会减少锅炉换热面上的水垢，改善锅炉的工作条件。

碳酸钠的反应如下：



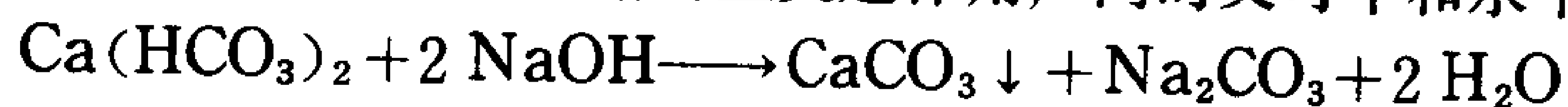
$$CaSO_4+Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3\downarrow+Na_2SO_4$$



$$CaCl_2+Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3\downarrow+2NaCl$$

用碳酸钠对供给水进行处理，在普通温度下可以大大降低供给水的硬度。如果对供给水进行加热，例如利用废汽将供给水加热接近100℃，再与碳酸钠反应，这比普通温度下将供给水进行软化较为经济。

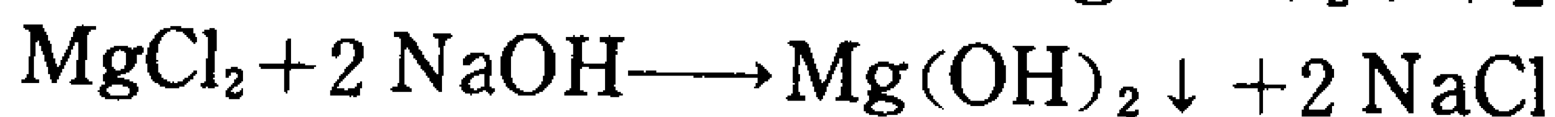
氢氧化钠不但能与生成水垢的盐类起作用，同时又可中和水中的游离酸，其反应如下：



$$Ca(HCO_3)_2+2NaOH \longrightarrow CaCO_3\downarrow+Na_2CO_3+2H_2O$$



$$Mg(HCO_3)_2+4NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow+2Na_2CO_3+2H_2O$$



$$MgCl_2+2NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow+2NaCl$$

氢氧化钠的用量要加以控制。水中含氢氧化钠过高，常常会使锅炉的衔接金属面发生苛

性脆化。

3　用离子交换剂处理供给水

供给水经过凝聚澄清后，除去了其中的悬浮物和胶体物质，但硬度仍比较高，不符合锅炉供给水的要求。所以除了投入氢氧化钠和碳酸钠使之软化之外，目前最广泛地采用的方法是用离子交换剂处理供给水，消除供给水中的阳离子 Ca^{2+} 和Mg^{2+} 这些造成水垢的物质。消除 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 后的水，称为离子交换软水或脱离子水。这些水可作为锅炉和柴油机冷却淡水的供给水。

离子交换剂分为无机和有机两种。在过去用得较广泛的无机交换剂是合成泡沸石。而有机交换剂分磺化煤和合成树脂两大类，后者是当今主要选用材料。合成树脂又分阳离子型（强酸性）和阴离子型（碱性）。离子交换装置的形式多种多样，但可简单划分为静态和动态两种类型。动态的离子交换装置又可分为单层或多层混合的固定床和连续流动床。

动态交换形式中，水在流动状态下进行交换。离子交换剂工作层固定不动为固定床，而流动床则可使离子交换剂在运行过程中不断地再生，使运行始终保持连续。

船舶供给水处理常用的一种形式是固定床的运行方式，水由上而下不断地通过各离子交换剂工作层，水中的Ca^{2+}和 Mg^{2+}首先遇到处于工作层表面的交换剂，如果采用的是钠型离子交换树脂，Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 就会与离子交换树脂中的 Na^{+} 进行交换，表面层作用失效后，水再通过时，其中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的交换作用就渗入到各工作层中的交换剂去，交换作用一层一层自上而下由表入里，直至离子交换能力失效。由此可知，从离子交换装置出来的水水质良好时，说明离子交换作用在工作层中间进行；当离子交换作用下移到工作层的底部时，因交换作用不完全，从离子交换装置出来的水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的残留量就会增加。

离子交换装置在实际运行中，由于各部位的离子交换剂、各工作层以及再生条件的差异，并由于供给水通常含有多种的阳离子，同一层同一断面上水流速度又不一致，因此离子的交换和分布是不相同的，只是大致符合以上规律。

其它的交换方法只是再生运行方式和固定床不同，而交换过程和交换原理基本上是一样的。

低压锅炉供给水多采用钠型离子交换装置处理，中压锅炉供给水多采用二级钠型离子交换装置处理。如果供给水的碱度很高，为了降低其碱度，采用氢-钠型（H-Na）离子交换装置进行处理。

离子交换剂失效后，为了恢复其交换能力，要用再生剂进行再生。对钠型离子交换树脂，通常以食盐为再生剂，将食盐水反向冲洗工作层，以恢复工作层的交换能力。船舶离子交换装置用海水作为再生剂。

表 2.5.4-1　**常用的部分国产离子交换树脂**

产品牌号及名称	701 环氧型弱碱性阴离子交换树脂	704 苯乙烯型弱碱性阴离子交换树脂	711 苯乙烯型弱碱性阴离子交换树脂	717 苯乙烯型强碱性阴离子交换树脂	732 苯乙烯型强酸性阴离子交换树脂	磺化煤
外观	金黄至琥珀色球状颗粒	淡黄色球状颗粒	淡黄至金黄色球状颗粒	淡黄至金黄色球状颗粒	淡黄至褐色球状颗粒	黑色颗粒
全交换量（mg 当量/g）	≥9.0	≥5.0	≥3.5	≥3.0	≥4.5	

续上表

产品牌号及名称	701 环氧型弱碱性阴离子交换树脂	704 苯乙烯型弱碱性阴离子交换树脂	711 苯乙烯型弱碱性阴离子交换树脂	717 苯乙烯型强碱性阴离子交换树脂	732 苯乙烯型强酸性阴离子交换树脂	磺化煤
粒度	10～50 目 90%以上	16～50 目 95%以上	16～50 目 90%以上	16～50 目 90%以上	16～50 目 95%以上	0.5～1.2 mm 0.3～0.7 mm 80%以上
相对密度	1.05～1.09	1.04～1.08	1.04～1.08	1.06～1.11	1.24～1.29	
水分(%)	58～68	45～55	50～60	40～50	46～52	
离子型式	OH^-	Cl^-	Cl^-	Cl^-	Na^+	Na^+
允许 pH值	0～9	0～9	0～12	0～12	1～14	≤9
再生剂用量 (kg/m³)	30%NaOH 200	30%NaOH 280	30%NaOH 240	30%NaOH 240	30%HCl 370	
再生时间 (h)	1～1.5	1～1.5	1～1.5	1～1.5	0.5～1.0	0.25
淋洗水用量 (m³/m³)	10～15	10～15	12～16	12～16	5～8	4
淋洗时间 (h)	1.5～2.5	1.5～2.5	2～3	2～3	1～1.5	½～⅔
使用最高温度(℃)	≯50	≯50	≯50	≯50	≯50	≯40
年耗损率						10～15%

第 5 章　柴油机冷却淡水处理

现在，多数柴油机的缸套、活塞、喷油器用淡水冷却，但如果不进行正确的水处理，冷却水系统中的铁仍会氧化生锈而受到腐蚀，如果冷却水的含盐量大（特别是有海水漏进来的时候），腐蚀会更严重。由于柴油机冷却水温度的提高、振动的影响、水中气泡的作用和不同金属的存在，会发生电化学腐蚀、空泡腐蚀和积结水垢等不良后果，从而降低传热效果，导致气缸套表面温度过高，气缸润滑油膜被破坏，造成缸套过度磨损或发生拉缸、咬缸现象，而且会造成缸套或缸头局部过热，甚至产生裂纹。水垢泥渣严重时，会堵塞冷却水通道，腐蚀的结果缩短了冷却水管系统和设备的使用寿命。

1　处理原理

冷却水系统中存在的各种金属元素形成电位差，产生电池效应即电化学腐蚀。柴油机冷却淡水处理就是往冷却水系统中加入某些起钝化作用的化学药品或乳化防锈油，以对系统起保护作用。由于环境保护的要求，使用乳化防锈油处理已越来越少。

起钝化作用的化学药品可以大致分为阳极钝化剂和阴极钝化剂两种。阳极钝化剂防止阳极表面上的阳离子进入电解质(即水中)，这类钝化剂包括碳酸盐、磷酸盐、铬酸盐和亚硝酸盐等，丹宁也可归入此类。它们能在作为阳极的金属上形成保护膜，但浓度必须足够。如果作为阳极的金属未能完全受到保护膜覆盖，将会形成小阳极和大阴极，使相对小的阳极区有高度密集的电流通过，这会产生严重的局部腐蚀。阴极钝化剂可防止作为阴极的金属失去电子，这类药品有重碳酸钙等。这些药品都有其优缺点，一些药品价格贵，一些药品对环境有不良影响不能采用。因此，目前常以亚硝酸盐和硼酸盐为主的化学药品来处理柴油机冷却淡水。这类药品的优点是保护效果较好；需要的投药量较低，只需 0.5%以下的数量即可；价格便宜；投药浓度如处置不当，过高或过低，也不致增加腐蚀；不会引起皮肤病；药品容易得到；能得到一些部门批准用于生活用的海水淡化装置在内的冷却淡水系统。其缺点是需要船上用专门仪器定期化验其浓度；对锌和镀锌管有腐蚀作用，使锌脱出产生沉积物；另外，亚硝酸盐有一定的毒性，在使用中需注意人身安全保护。

2　对柴油机冷却淡水的水质要求

柴油机制造厂对冷却淡水的水质都提出了要求，下面是 SULZER 提出的要求：

1)使用完全脱离子的淡水（例如海水淡化装置产生的蒸馏水）或者以蒸汽驱动的辅机的冷凝水作为冷却淡水，加入水处理药剂作合适处理，否则有严重的腐蚀危险。

2)如果没有完全脱离子的淡水可供利用，可以将饮用水作为冷却淡水，但水的硬度不能超过 10°(德国度)，水中的氯化物或硫酸盐含量不要超过 50 ppm。尽管冷却淡水已经过软化和投放水处理剂，但如含有大量的氯化物或硫酸盐，仍会加速腐蚀。

MAN-B&W 对冷却淡水的水质要求是：

水的类型：不含杂质的淡水；

总硬度：最高不超过 10°（德国度）；

pH 值：6.5～8；

氯离子含量：最高不超过50 ppm。

最好以蒸馏水（例如海水淡化装置产生的水）或离子交换器产生的完全脱离子水作为冷却淡水，这类水没有石灰质和金属盐，不会形成降低热传导效果的沉积物。但是，这类水比通常的硬水具有更大的腐蚀作用，因为硬水会在系统中形成一层薄薄的石灰沉积物，对系统起到临时的保护作用，防止系统受到进一步腐蚀。而使用蒸馏水或脱离子水则无此效果，因此，使用蒸馏水或脱离子水作柴油机冷却淡水时，必须特别注意搞好水处理，定期化验，确保水处理剂的浓度达到规定的范围。

3 我国交通部规定的柴油机冷却水处理办法

3.1 药剂

交通部颁发试行的《亚硝酸钠-四硼酸钠船舶柴油机冷却水处理办法》中规定的药剂组分为：

1)亚硝酸钠（$NaNO_2$）80%；

2)四硼酸钠（$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$）20%。

在柴油机冷却水系统中投入适量的亚硝酸钠能在与水接触的金属表面上生成一层保护膜。这层具有钝化作用的保护膜完整地布满于与水接触的金属面上，它将有效地防止冷却水系统的腐蚀和减缓水垢的形成。

四硼酸钠是一种碱性物质，能提高水的 pH 值，有利于保护膜的形成。

3.2 处理步骤

1)在使用亚硝酸盐处理防腐剂时，应将锌阳极防腐块拆除；

2)用蒸馏水或自来水灌满冷却水系统，使膨胀水柜的水位处于最低水位；

3)将规定的药剂数量放到清洁的容器里用淡水溶解后，倒入膨胀水柜，开动循环水泵，然后补充蒸馏水或淡水，使膨胀水柜达到正常水位；

4)首次投药每吨冷却水加入亚硝酸钠 4 kg 和四硼酸钠 1 kg；

5)使柴油机运转不少于 24 h，以确保冷却表面形成一层稳定的保护层；

6)投药循环 4 h 后，方能取样用试验仪器化验。正常情况下要求每星期化验一次，并记录好。为了确保溶液中的防腐处理剂有足够的浓度，最佳 pH 值应为 8 ～ 9；

7)在冷却水系统的膨胀水柜前装一只水流量表，以便控制新鲜淡水补给量，并按前述比例加药；

8)每 3 ～ 4 月排渣一次；

9)必须防止冷却水系统泄漏，避免药物浪费和混入润滑油系统；

10)固体亚硝酸钠具有毒性，应妥善保管，用后洗手。

3.3 控制指标

亚硝酸钠含量控制在 3000～4500 ppm（即每吨水中含 3.0～4.5 kg 亚硝酸钠）。

3.4 化验步骤及浓度调整

1)化验仪器

10 ml 棕色自动滴定管一支；

500 ml 棕色广口瓶一个；

250 ml 三角瓶一个；

25 ml 量筒一只；

橡皮胶塞一只；

双连球一只；

玻璃弯管一只。

2)化验试剂

0.58 N 高锰酸钾溶液；

1 ∶ 4 硫酸溶液；

3)化验步骤

先量取 25 ml 水样放入三角瓶中，加入 1 ∶ 4 硫酸溶液 5 ml；再用 0.58 N 高锰酸钾溶液逐滴滴定至水样变成红色，保持 30 s 不退色即为终点；记录消耗的 0.58 N 高锰酸钾溶液的毫升数。

4)浓度调整要求见表 2.5.5-1。

表 2.5.5-1

0.58 N 高锰酸钾溶液消耗量(ml)	相当于亚硝酸钠(kg/t 水)	亚硝酸钠投量(kg/t 水)	四硼酸钠投量(kg/t 水)	0.58 N 高锰酸钾溶液消耗量(ml)	相当于亚硝酸钠(kg/t 水)	亚硝酸钠投量(kg/t 水)	四硼酸钠投量(kg/t 水)
0	0	3.5	0.9	2.9	2.5	1.0	0.25
0.6	0.5	3.0	0.75	3.5	3.0	不需投药	不需投药
1.2	1.0	2.5	0.6	4.1	3.5	不需投药	不需投药
1.8	1.5	2.0	0.5	5.1	4.0	不需投药	不需投药
2.4	2.0	1.5	0.4				

4 国外部分冷却水处理剂

船舶使用的冷却水处理剂品种繁多，国外部分冷却水处理剂牌号及使用方法介绍如下：

1)德鲁船用化学品公司（Drew Ameroid Marine）的 DEWT-NC 药剂

(1)药剂外表　白色自由流动粘状固体。

(2)药剂性质　溶解度：25%（在 24℃时）

密度：0.98 kg/l

5%溶液 pH 值：11.0

(3)控制指标　DEWT-NC 的最佳浓度是 3000～4500 ppm。

(4)化验和处理方法

用专用仪器和专用的 1 号、2 号试剂，每周化验和处理一次，化验方法：

①将冷却水样加入量筒内 25 ml处。

②加 5 量匙一号试剂至量筒内，混合至药剂全部溶解。

③加 1 量匙 2 号试剂至量筒内，加盖塞，并摇匀。

④如水样变为粉红色或红色，并保持 30 s，试验即到终点。

⑤如水样不变色或变色后 30 s 内消失，再加 2 号试剂 1 量匙，充分混合，直至水样变为粉红色或红色，并保持 30 s 不褪色为终点。

⑥记录所加2号试剂的量匙数，2号试剂的量匙数与NC浓度和投药量关系见表2.5.5-2。

（5）使用时应注意的事项　避免药品接触眼睛、皮肤和衣服、操作时戴橡皮手套、护目镜，避免吞服，密封贮存。

2)碧浪灵船用化学品公司（Perolin Marine）的FORMET 326药剂

（1）药剂外表　白色粉状的亚硝酸盐-硼酸盐化合物。

（2）药剂性质　1%溶液pH值：9。

（3）控制指标

一般情况下，FORMET浓度是0.25%，如系统结垢严重浓度是0.50%。

（4）化验及处理方法　有专用仪器，装在小盒子内，用来确定水中亚硝酸盐的成份，用ppm表示，化验方法：

表2.5.5-2

2号试剂量匙数与NC浓度、投药量关系

2号试剂量匙数	NC浓度(ppm)	每吨水投药(kg)
1	0	3.2
2	500	2.7
3	1000	2.3
4	1500	1.8
5	2000	1.4
6	2500	0.9
7	3000	0
8	3500	0
9	4000	0
10	4500	0
11	5000	高

①在空玻璃瓶中倒入冷却水样，到刻线为止。

②加入3滴1号试剂，摇动使之彻底与水混合。

③逐滴滴入2号试剂，每滴入一滴后摇动瓶子，水溶液变青绿色为终点，记录所用滴数。

亚硝酸盐的浓度＝（滴数×100）ppm

冷却水系统中若用的是蒸馏水，则亚硝酸盐的浓度在1200～2800 ppm时为合适。在特殊情况下，如有高频震动腐蚀现象时，需用双倍剂量。

若以前冷却水没有处理，积下水垢，需将用量增加两倍，并定期放出一部分水去除积垢、铁锈及泥渣。

在投药前，将药粉用6倍的热水溶解后，加入到冷却水系统中。

（5）使用时应注意的事项　避免与其他物品混合和接触热源。操作时戴橡皮手套，护目镜；眼睛和皮肤接触药品后，立即用大量水冲洗；切忌入口。

3)马力达船用化学药品公司（Magnus Maritec Inter, Inc.）的NCL DIESEL WATER TREATMENT药剂

（1）药剂外表　淡黄色液体。

（2）药剂性质　由亚硝酸盐、抑制剂等组成的混合剂，密度1.22 kg/l、pH值（100%浓度溶液）为12.0～12.5，pH值（1%浓度溶液）为9.0～10.0。

（3）控制指标　亚硝酸盐含量保持在1500～2000 ppm，pH保持在8.5～9.5。

（4）化验和处理方法　用专用仪器和试剂化验，化验方法如下：

①在试管内放入25 ml冷却水样。

②加入1量匙结晶硫酸盐于水样中溶解。

③加入高锰酸钾溶液，每次1滴，水样变为粉红色，保持1分钟不褪色为终点，计算加入的高锰酸钾溶液滴数。

④加入的每滴高锰酸钾溶液相当于冷却水系统中含有100 ppm亚硝酸钠。投药处理见表2.5.5-3。

(5)使用时应注意的事项　本药品不得入口，操作时戴橡皮手套，护目镜或防护面具，不要与除水以外的其它东西混合。

4)加美仑化工产品公司（Gamlen Marine Division）的 GAMCOR NB 药剂

(1)药剂外表　粉剂。

(2)药剂性质　含有亚硝酸盐、硼酸盐和有机抑制剂，密度 1.27 kg/l，pH（1%溶液）为 9.0，溶解度为 60 g/l。

(3)控制指标　亚硝酸根浓度保持在 1500 ppm。

(4)化验及处理方法　用专门仪器和试剂化验，化验方法如下：

表 2.5.5-3

亚硝酸钠浓度与投药量关系

亚硝酸钠ppm值	投药量(l/t水)
超过 2000	不必投药
1500～2000	满意
1000	2
800	2.8
600	3.6
400	4.4
200	5.2

①取水样前，用冷却水冲洗取水样容器

②以水样水洗净塑胶刻度吸管，洗净后，装 0.5 ml水样，放入一根刻度试管内。

③将软水加入刻度试管的 10 ml刻度处，套上管塞后，将管倒置，使管内液体混合。

④倒 5 ml水样至另一根刻度试管内，加入一粒 Nitri Ver II 试剂，摇匀，如水样含有亚硝酸盐，则呈青棕色。颜色呈现过程约需 5 min。

⑤将此管放入比色块右开口处。

⑥将另一根试管放入比色块左开口处。

⑦将比色块对光观察和调试，调到颜色相符处，将读数乘 20，即为亚硝酸根ppm数，再乘 1.5 为亚硝酸盐的ppm数

初次投药：每 1000 l水投入 3 kg药品。正常情况为每 1000 l水需投药量＝(1500－测得的亚硝酸根ppm数)×2，单位为 g。

5)使用时应注意的事项　本药品不得食用，操作时带橡皮手套、护目镜和防尘罩，存放时远离易燃品、热源和其它化学品。

6)威金公司（Vecom）的 QC-2/QC-2 液体

(1)外表　白色粒状体液体。

(2)药剂性质　亚硝酸盐、硼酸盐并结合专门的有机抑制剂和分散剂，pH（1%溶液）为 9.2。

(3)控制指标　QC-2 浓度保持在 3000～4000 ppm（专门仪器显示读数为 60～100)。

(4)化验及处理方法　用专门仪器化验。

亚硝酸盐试验：

①在冷却水系统中循环良好处取水样。

②用水样冲洗滴管并充入水样水至 0.5 ml刻度处（最低格)。

③将 0.5 ml放至刻度试管中。

④往刻度试管中加入蒸馏水至 10 ml刻度处，并倒其中 5 ml至第二根试管中。

⑤往第一根试管中加入亚硝酸盐专用试剂，摇匀，呈青棕色。

⑥将第一根试管放至比色块右边，第二根试管放至比色块左边，对着亮光观察和转动盘子直到颜色相符，记下读数，清洗化

表 2.5.5-4

QC2浓度与导电率关系

QC2浓度(ppm)	(μΩ)导电率
5000	6100
4000	4900
3000	3800
2000	2600
1000	1400

验器具，比色块读数乘 40 即为含 QC 2 ppm数。

导电率试验：

①按表 2.5.5-4 中QC 2 的含ppm数查出相当的导电率。

②将导电率测量器调到高读数范围，将测量器探头放到淡水中测得读数 $\mu\Omega$。

③将两数字相减，即为导电率。

初次投药时，每立方米冷却水投入 4.0 kg QC 2 或 8 lQC 2 液体，第二天化验，按情况补充投药

在正常情况下，每 6 天化验并投药 1 次，QC 2 含量低于 3000 ppm，每吨水投入 1 kgQC 2 或 2 LQC 2 液体；导电率高于 300 $\mu\Omega$ 时，要放掉一部分水并补入蒸馏水。

投药时，水箱可以作为活塞和喷油器冷却水的投药点，主辅机冷却水系统最好从循环水泵吸入口和出口接投药器旁通加药。

（5）使用时注意事项　本药品切忌接近可燃材料；不能食用。

5　用酸洗溶液清洗冷却水系统

冷却水系统可能为水垢、铁锈、油和燃烧残渣、油焦、海水等所污染，因此在采用冷却水处理措施前必须清洗系统。按照其被污染的情况采用不同的清洗方法：如对水垢铁锈可用磷酸，柠檬酸或氨基酸浸渍，再以特种中和剂清洗钝化。对油焦残渣可用甲酚或甲酚基产品清洗。

清洗方法如下：

1）拆除所有锌阳极防腐块（锌块可能装在增压器冷却水系统中），灌满清洁的自来水，并将水加热至 70～75℃。

2）备好所需数量的酸性化合物。

3）如果柴油机在清洗前进行过处理，则按厂商推荐的最低浓度配制。如果柴油机未进行过处理，则按冷却水系统状况，采用较高的浓度。

4）先在清洁容器内加入一半水，然后慢慢地加入酸性化合物，同时不停地搅拌，最后将容器加满热水继续搅拌。

5）从冷却水系统中放掉一些水，经由膨胀水箱加入酸性溶液。注意此时系统不要保持压力。

6）将水温保持在 70～75℃，并使之不断地循环。这种处理的持续时间，取决于积垢程度。冷却水系统如经过处理，时间可适当短些；未经过处理，时间自然要长一些。

7）每小时作一次 pH 值的测定试验，检查溶液中的酸度是否已中和。如果已被中和，则要加入新的溶液。在这种情况下，应选用推荐的最弱酸度。

8）除垢完毕后，放掉系统内溶液，并用水冲洗。残余的酸可用每吨水溶有 10 kg碱的淡水中和。碱水混合物在系统内循环 30 min，然后排出，并冲洗该系统。

9）冷却水系统，持续不断地被冲洗，直到水呈中性（$pH \simeq 7$）。

国外有关清洗冷却水系统的药品种类很多，使用时请看该产品的使用说明书。

6　抗冻处理

如果柴油机的冷却装置或冷却水系统所处位置的温度低于水的冻结温度，而系统又暂时不能加热时，就要将抗冻剂同时又是腐蚀抑制剂的化学药品放入冷却水系统中去。

一般情况下，冷却水中如果放入至少 20%的抗冻剂，就足以防止腐蚀，并可使水的冻结

点低于零下 10℃，其投放比例应按该部位的最低温度而定。

抗冻剂的主要成分是乙二醇。如果在该种乙二醇浓度下，不足以起到防止腐蚀作用时，就要往水中再放入合适的防止腐蚀的冷却水处理剂，这时必须搞清楚冷却水处理剂和抗冻剂能否一起使用。另外，多种抗冻剂虽然主要成分为乙二醇，但它们能不能一起使用，仍然要查问清楚才能确定。可见表 2.5.5-5 和 2.5.5-6。

如果用乳化防锈油处理冷却水，则不能加入任何抗冻剂，否则乳化会受到破坏，并形成大量油泥。

表 2.5.5-5 可与乙二醇抗冻剂一起使用的冷却水处理剂

公司名称	药品名称
Bedia	Liquid Perry LP 20
Dearborn Chemical Comp. Ltd.	Dearborn 537
Drew Chemical Corp,	DEWT-NC Maxigard
Nalfloc Ltd.,	Nalfleet 9-121 9-131 9-131 c
Rochem	Rochem Rocor NB
Perolin	Formet 326

表 2.5.5-6 起腐蚀抑制剂作用的抗冻剂

公司名称	药品名称	公司名称	药品名称
Badische Anilin & Soda-Fabrik	Glysantin 3059/8029	ESSO	Kühlerfrostschutz
Castrol Marine Division	Anti Freeze (Code 236)		WSN 0987
BP	Antifrost X 139	Höchst	Genantin 78/77
Shell	Glycoshell P 300	Mobil	Frostschutz 500

第 6 章　海水系统的水处理

海水系统（包括海水热交换器）被海生物污染与腐蚀，是有机体生物繁殖的结果。管系中来回游动的软体动物及系统内无氧硫酸脂生成的细菌，可产生腐蚀。为了抵抗海生物的污染，抑制锈蚀，特采取如下办法对海水系统进行处理。

1　用化学药品进行处理

国外一些化学药品公司配制了一些化学处理药剂，对海水系统进行处理。这种药品能在金属表面形成一层保护膜。保护膜由具有长键的胺分子所组成，能中和酸类，更能形成一层屏障，以抵抗电解腐蚀与由溶解氧所引起的腐蚀。这层保护膜含有广效杀虫剂，对引起污染的低级动物呈毒性反应，但对人类无害。

这些用来抗海洋微生物污染的药品介绍见表 2.5.6-1。

表 2.5.6-1　　国外抗海洋微生物污染药品

公司名称	德鲁船用化学品公司	碧浪灵船用化学品公司
处理药剂名称	Amersperse 280	Formet 350
药剂性质	纯清黄色液体，凝固点：－22℃，pH 值：11.5±1.0，密度：1.17±0.02	褐色稠液剂，闪点：100℃以上（开口），相对密度：1.02，pH 值：8.0（1%溶液）
处理方法	使用浓度为 10 ppm的化学药剂，每隔 3～4 天处理一次。每次处理持续时间为 100 min，药剂量为 1.5 l，可处理流量为 100 t/h 的海水	1)对海水进口与冷却海水系统处理：海水流量为 100 t/h，剂量 1.5 l，持续注入时间 1 h，每 48 h处理一次，如海水进口流速超过 2.5 m/s，剂量应增加至 2.5 l，持续注入时间 1 h，每 24 h处理一次 2)在热带水域对管道、冷凝器、热交换器处理剂量为 10 l，持续注入时间为 2 h每 7 天处理一次 3)对压载水舱处理每 100 t海水初次所用剂量为 7 l，以后每月每 100 t 海水加入剂量为 2 l 4)对舱底水处理 每 100 t海水加入药剂 1.5 l，每月处理一次
注意事项	1)药品要完全溶解于海水 2)必须用于清洁的系统，如果系统已污染有水垢，用人工清洁后再作处理 3)必须安装投药设备 4)不可吞服和触及眼睛皮肤，要避免污染食物，如误服，要立即饮大量牛奶、蛋白，如果无效，则饮用大量清水，并送医诊治，万一接触眼睛、皮肤，则用大量清水冲洗	1)用海水或淡水预先稀释 2)对冷却海水系统进行处理，必须安装可调计量泵容器和相应管路 3)本药品不能用于饮水仓要防止污染食物，避免吞服，触及眼睛和皮肤 4)操作人员要穿防护工作服和套鞋并戴手套，洒出来的药剂要清洗干净，一旦接触眼睛要用大量清水冲洗；如误服要饮催吐剂和送医诊治。

2　电解海水防污装置

2.1　原理

电解海水，产生氯气和次氯酸，与冷却用海水混合。次氯酸钠是强氧化剂，能破坏海生物的蛋白组织，从而防止海生物附着在海底门、管道、热交换器上。

电解时的反应如下：

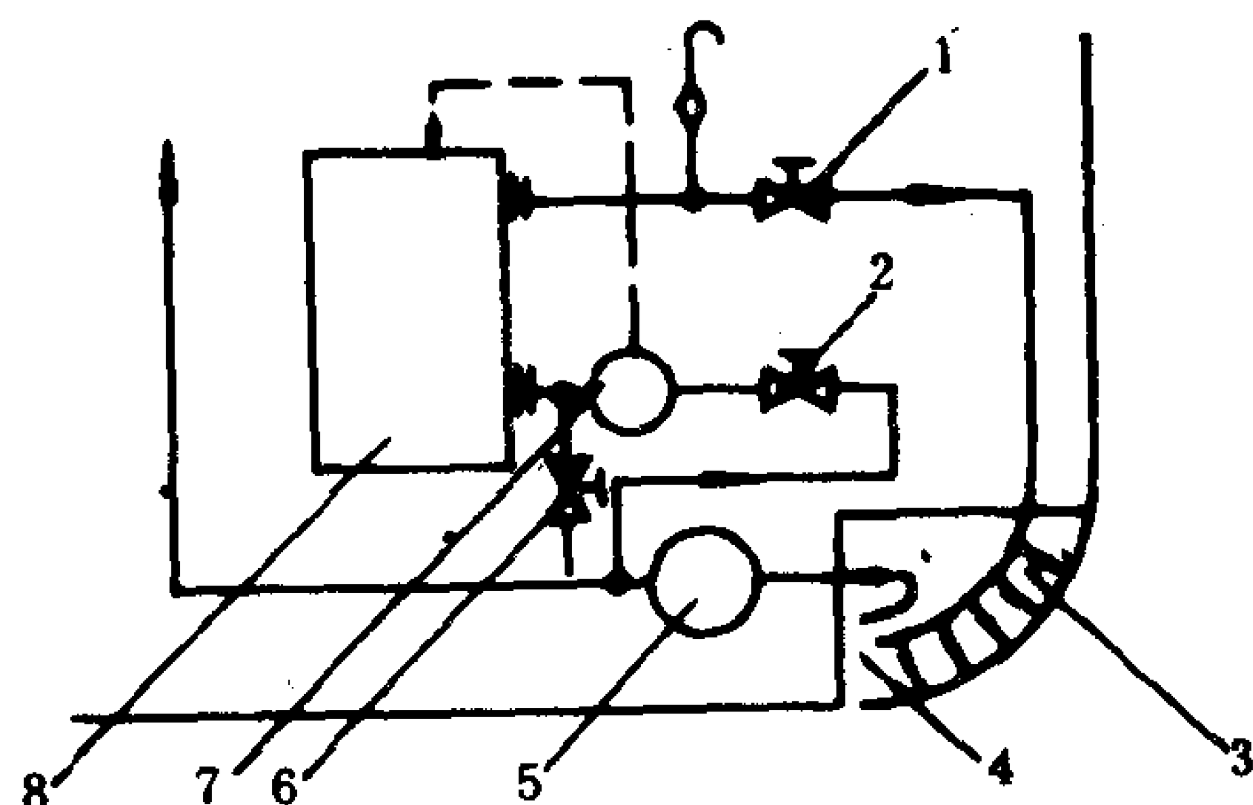


图 2.5.6-1　电解海水防污装置示意图

1-出口截止止回阀；2-进口截止止回阀；3-低位海底门喷管；4-海底门；5-海水泵；6-截止止回阀；7-流量计；8-电解槽

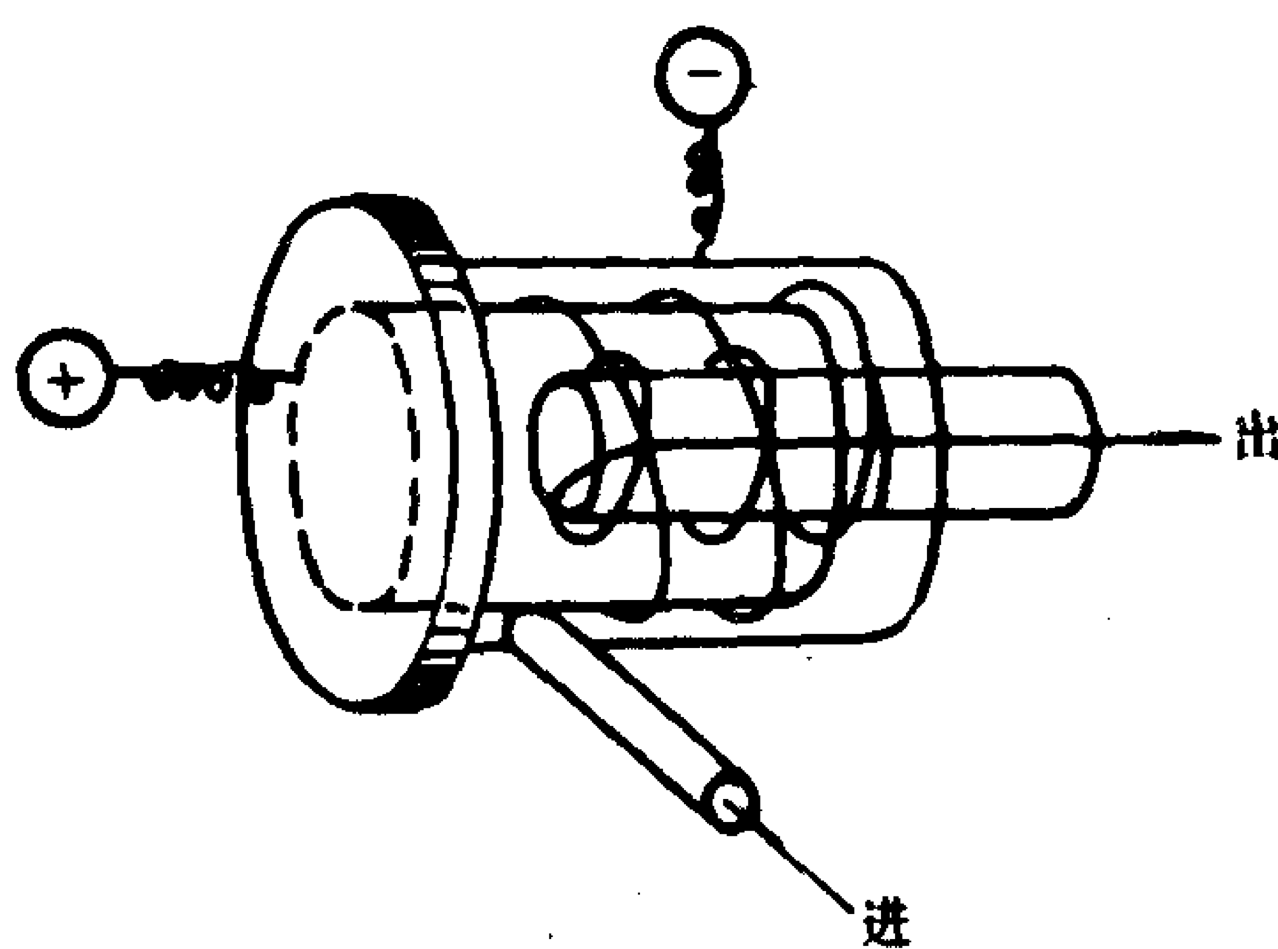


图 2.5.6-2　水流形状图

阳极：$2\,Cl^- \longrightarrow Cl_2 + 2\,e^-$

阴极：$2\,Na^+ + 2\,H_2O + 2\,e^- \longrightarrow 2\,NaOH + H_2$

生成的氯和氢氧化钠产生反应

$Cl_2 + 2\,NaOH \longrightarrow NaClO + NaCl + H_2O$

$NaClO \xrightarrow{\text{海生物}} NaCl + [O]$

2.2　基本流程

图 2.5.6-1 是一种有代表性的电解海水防污装置示意图。

海水泵出口接一根支管，海水经流量计进入电解槽进行电解，然后从电解槽出口进入电解液输送总管，再通过各种电解液输送支管到达各海底门水箱内的喷管喷出（图 2.5.7-1 只示出一根管），海水泵从海水箱内（或吸入口）吸入与电解液混合的海水后，将它送入冷却水管路系统，以达到防止海生物吸附在海水系统中的目的。

2.3 特点

这套装置充满海水，为防止被海水腐蚀，电极（阳极）使用钛作为基本材料，内外镀铂，约可用两年再更换。电解槽呈圆筒形，属阴极。海水自进口管进入，呈二重螺旋形的水流，水流畅通，没有死点死角，确保电解效率良好（图 2.5.6-2）。

为了保护电极，当电解海水流量下降，阳极上的铂耗尽或螺旋形水流受到阻碍时，电解均会自动停止。

参考文献

〔1〕石油化工科学研究院：石油产品标准汇编，中国标准出版社，1981

〔2〕石油化工科学研究院：石油和石油产品试验方法，中国标准出版社，1985

〔3〕《修造船资料手册》编写组：修造船资料手册（油物料分册），人民交通出版社，1978

〔4〕上海石油商品应用研究所：各国石油产品手册，上海科学技术文献出版社，1985

〔5〕日本机械学会：机械技术手册（中册），机械工业出版社，1984

〔6〕石油化工科学研究院：中国标准出版社，1981

〔7〕石油化工科学研究院：石油和石油产品试验方法，中国标准出版社，1985

〔8〕机械工程手册编委会：机械工程手册，机械工业出版社，1978

〔9〕欧　风：石油产品应用技术，烃加工出版社，1986

〔10〕黄乙武：液体燃料的性质和应用，烃加工出版社，1985

〔11〕邓自昌等：船舶燃油、润滑油和水处理，人民交通出版社，1983

〔12〕上海石油商品应用研究所：各国石油产品手册，上海科学技术文献出版社，1985

〔13〕M.W.兰奈：内燃机燃料添加剂，烃加工出版社，1985

〔14〕李祖培、郭庆勇等：油漆结构学与施工，国防工业出版社，1978

〔15〕*И.Я.*鲍戈拉德等：海船的腐蚀与保护，国防工业出版社，1983

〔16〕日本造船学会编，冠立人译：造船涂料涂装工作法，复兴出版社印行

〔17〕舒布尼科夫等著：燃料、水与润滑剂工艺学，人民铁道出版社，1957 年

〔18〕杨　鸥编译：船舶水质处理，人民交通出版社，1985

〔19〕周经伟、刘锦等：船用柴油机设计手册，国防工业出版社，1979

〔20〕原燃料化学工业部涂料技术训练班：涂料工艺，石油化学工业出版社，1975

〔21〕Petroleum products-Fuels (class F) -Specifications of marine fuels, International Standard ISO 8217,1987

〔22〕The storage and handling of marine fuel oils onboard ship, General Council of British Shipping,

〔23〕Technical Tables and Charts, Chevron International oil Company

〔24〕Mobil Product-Health and Safety Guide, Mobil Hongkong Limited, 1987

〔25〕Health and Safety-Marine Fuels and Lubricants, British petroleum company, 1987

第 3 卷

金属与非金属材料

主　　编　杨烈宇
副 主 编　陆　信
主　　审　牛求煌　孙寿楠
执　　笔　邓世琮　冯广勤　李国卿　陆　信　陈雁荡　张一公　杨烈宇
倪　暹　曾长荪
特约编辑　牛求煌
责任编辑　蒋明耀

第1篇　金属材料

轮机设备所采用的材料，按其本质、机械性能、物理化学性能、工艺性能以及获得方法的不同可分为金属与非金属两大类。

金属材料又分为黑色金属和有色金属。黑色金属包括铁及其全部合金，种类繁多。其中，铁和碳以及其它元素的合金，凡是碳的成分低于2％的，均称为钢；碳的成分超过2％的，则均称为生铁或铸铁。钢和铸铁的性能如果基本上是由铁和碳成分反映的，分别称为碳钢或普通铸铁；如其性质因加入其它合金元素而反映出来的，则分别称为合金钢或合金铸铁。根据国家技术政策和经济性要求，在生产中提倡以铸铁代钢，以碳钢代合金钢和以普通铸铁代替合金铸铁。合金钢中又主张以国产资源丰富的硅锰系合金钢代替比较昂贵的镍铬系合金钢。目前，轮机设备中的构件，大多数是用钢和铸铁制造的。

除铁及其全部合金以外的所有金属及合金，都称为有色金属。工程上常用到的可分为三类：一是相对密度大、熔点高的，如Cu、Ni及以Cu、Ni为基的合金；二是相对密度小、熔点中等的，如Al、Mg及以Al、Mg为基的合金；三是相对密度大、熔点低的，如Zn、Sn、Pb及以它们为基的合金。

Al、Cu及其合金，和以Sn与Pb为基的轴承合金，在轮机设备中用途最广，但因Cu产量较少而价昂，国家提倡节约用Cu及Cu基合金。

必须强调指出，大多数的黑色金属及其合金和有色金属及其合金，在保持原来制件的形状和尺寸下，通过热处理的方法（一般是加热、保温和不同速度的冷却过程，特殊的是不变表层成分与改变表层成分的各种表面处理），能提高它们的强度、硬度、韧性、可塑性、耐磨性、耐疲劳性、耐腐蚀性、热安性和使用寿命；可以减小制件的直径或厚度，而且有大厚件的相同承受能力；可以应用简单成分的合金，代替复杂成分的合金等；即热处理方法能够挖掘金属及其合金潜在的性质，也就是能直接影响金属材料的选择。

显然，因不同用途而选用轮机设备构件的金属材料时，为了必须做到适材适价和合乎经济原则，不仅要熟悉金属和不同成分合金出厂时的国家标准(GB)中规定的原始成分和性质，而且还要在熟悉通用热处理原理与操作工艺基础上，熟悉各该金属及其合金的热处理规范和经不同热处理后可获得的性能数据。

除金属以外的一切材料均称为非金属材料。它们又分为两类：即一类为有机材料如塑料、橡胶、木材等；另一类为无机材料，如石棉、耐火材料、陶瓷材料等。在近代轮机设备中，已日益增多和研究发展对它们的应用。例如，由于船用柴油机燃烧室内的燃气温度可达1400～1800℃，近年已开始出现了研究试用陶瓷材料代替金属材料的成功报导。

总的说来，对于轮机设备构件的选材或轮机工程材料的选用原则，主要是按照它们的用途特点并力求在实际运行工况下，保证有足够的可靠性。通常提出如下几点要求：

1．合适的机械性能：即具有抵抗由于某种应力和摩擦作用而产生失效或破坏的能力。例如船用柴油机的曲轴，在运转中要受到数值很大且是周期变化的扭转、弯曲和压缩等多种载

荷（应力）的作用。因此要求曲轴材料具有良好的综合机械性能和疲劳强度。此外，主轴颈和曲柄销要承受摩擦，故还要要求材料具有较高的耐摩性。又如活塞销是活塞和连杆间的连接件，它既要起到力传递的作用，又要承受强烈的冲击和交变弯曲载荷(交变弯曲应力)，又因是两个件的摆动轴，表面还要受到严重摩擦，故极易磨损。因此活塞销的材质，其表面须有高的硬度和耐磨性，心部要有足够的强度和冲击韧性。所以大多采用低碳钢、低碳合金钢或中碳钢制造再配以适当的热处理来达到。

2．足够的耐久性：即具有抵抗外围介质使质量变坏或发生破坏作用的一定耐用度，例如柴油机的活塞，它与气缸盖、气缸共同组成燃烧室，是实现热能转变成机械能的主要部件，其顶部直接受到高温高压燃气的作用，活塞环槽则与活塞环的上下两端面作相对滑动，并受到燃气的冲刷，所以这两部位极易受到磨损，要求材质不仅要有好的常温和高温机械性能以及耐磨性，还特别要求具有高的抵抗燃气腐蚀的能力，而且导热性要好。又如进气阀和排气阀的工作温度分别为300～400℃和750～800℃，一直受到高温气体的冲刷和腐蚀，所以选择材料和热处理时，应满足在高温下抵抗腐蚀、蠕变、疲劳、热冲击和磨损的要求，才能达到一定的耐用度。

3．良好的加工性：即具有容易经受铸锻焊、切削加工等操作而不降低质量的能力。

4．符合验收条件和经济原则。

鉴于以上基本要求，本卷的主要内容为：

1．金属材料的基础知识；2．钢铁材料的热处理及表面强化；3．轮机常用各类钢材型号、规格、化学成分、机械性能和使用范围。4．轮机常用有色金属及合金；5．轮机零件的典型失效形式及材质分析；6．金属材料的腐蚀与保管；7．非金属材料（含塑料、橡胶、胶粘剂、木材、石棉、耐火材料、陶瓷材料；8．金相技术。）

第 1 章　金属材料的基础知识

1　金属与合金（钢铁和有色金属）的基本概念

在元素周期表上，迄今已确认的103种元素中，凡具有特殊的光泽和可锻性、优良的导电性和导热性的元素称为金属。金属原子在固体状态以金属键相互结合，这是它们具有一系列物理共性的原因，也是它们与非金属相区别的实质。

在自然界的103种元素中，81种为金属元素，占总数的78%以上。现代工业中常用的金属有铁、铝、铜、锰、铬、镍、锌、锡、铅、钛、锆、铌、钼、钨等。

金属的种类很多，工业上通常把金属分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属是指铁、锰、铬及它们的合金。工业上常用的绝大多数黑色金属是指铁及其合金，故有的国家把黑色金属称为铁属金属。除这三种金属以外的所有金属及其合金统称为有色金属；有的国家则称为非铁属金属。

所谓合金，是指由两种或两种以上的金属元素或者金属元素与非金属元素所组成而具有金属性质的物质。例如，普通碳钢是铁和碳的合金，黄铜是铜和锌的合金，青铜是铜和锡的合金。现代科学技术已可通过控制合金化学成分、调整冶炼和加工方法等手段赋予合金各种预定的性能。合金的性能远比组成它们的单质金属要好，更能满足现代生产和生活的需要。因此，合金是现代化建设中不可缺少的重要物资，尤其是钢铁材料应用得极为广泛。

1.1　黑色金属的分类

黑色金属的分类见表3.1.1-1

表3.1.1-1　**黑色金属的分类**

类别	说　　明
生铁	铁矿石经高炉冶炼后的产品即为生铁。生铁是含碳量大于2%的铁碳合金。工业上实际应用的生铁一般含碳小于4.5%；此外尚含有硅、锰、磷、硫等元素。生铁分成三大类 炼钢生铁：一般含硅量较低(≤1.75%)，含硫较高(≤0.07%)，是炼钢的主要原料。炼钢生铁硬而脆，因为其中的碳主要以化合物形态存在；断口呈白色，所以也叫白口铁 铸造生铁：一般含硅量较高(≤3.75%)，含硫稍低(≤0.06%)。由于它的熔点低、流动性好，主要用于铸造各种生铁铸件，所以也简称铸铁。铸造生铁中的碳主要以游离的石墨形态存在；断口呈灰色，所以也叫灰口铁 合金生铁：用含有共生金属和铜、钒、镍、锰等的铁矿石炼成的生铁就是合金生铁。合金生铁不同于合金铸铁。后者中的合金元素如铜、铬、钼等是在熔炼时为了提高铸件的机械性能特意加进去的
钢	炼钢生铁经炼钢炉熔炼使碳元素降到规定含量后的产品即为钢。钢的产品有钢锭（供轧制成各种钢材）和直接铸成钢铸件两类。钢是含碳量大不于2%的一种铁碳合金。此外尚含有硅、锰、磷、硫等元素，不过这些元素的含量要比生铁中的少

续上表

类别	说　　　明
工业纯铁	工业纯铁是含碳量小于 0.04%的铁碳合金。它也是经过炼钢炉熔炼而得的，杂质总含量约为 0.1%，亦即含铁量约为 99.9%。工业纯铁的强度和硬度都很低，故不能用作机器零件材料。它常作为软磁性材料用于电器、电机和仪表
铁合金	是指铁分别与硅、锰、钒、钛、铬等很多元素组成的合金的总称。铁与硅组成的合金叫硅铁；铁与锰组成的合金叫锰铁等。铁合金是将含有一定合金元素的矿石通过还原反应制得的。铁合金供用作铸造或炼钢的还原剂或合金元素的添加剂

1.2 有色金属的分类

有色金属的分类见表 3.1.1-2。

表 3.1.1-2　　有色金属的分类

类别	说　　　明
轻有色金属	轻有色金属一般指相对密度在 4.5 以下的有色金属，包括铝、镁、钠、钾、钙、锶、钡、钛。这类金属的共同特点是：相对密度小(0.53～4.5)，化学活性大，与氧、硫、碳和卤素的化合物都相当稳定。铝在有色金属中生产量最大，已超过有色金属总产量的三分之一；钛有优异的耐蚀性和比强度(强度与相对密度之比)，故已成为重要的结构材料
重有色金属	重有色金属一般指相对密度在 4.5 以上的有色金属，其中有铜、镍、铅、锌、钴、锡、锑、汞、镉等。铜是军工及电气设备的基本材料；铅在制作耐酸管道、蓄电池等方面有着广泛用途；镀锌的钢材广泛用于工业和生活方面；锡、锑、镉用于制造滑动轴承；而镍、钴则是制造高温合金与不锈钢的重要战略物资
贵金属	贵金属包括金、银和铂族元素(铂、铱、锇、钌、铑、钯)。此类金属不易与氧和其他试剂发生化学反应，而且在地壳中含量少，开采和提取比较困难，故价格比一般金属昂贵，因而得名贵金属。它们的特点是相对密度大(10.4～22.4)，其中铂、铱、锇是金属元素中最重的 3 种：熔点高(1769～3045℃)；化学性质稳定，能抗酸碱腐蚀(银和钯除外)。另外，金和银具有良好的可塑性和延展性，钯、铂的可塑性也较好，其它元素均较脆。金银有良好的导电性和导热性，铂族元素却很低。贵金属在工业上主要用于制作重要的电器触点、高温仪表元件等
稀有金属	稀有金属通常是指那些在自然界中含量很少，分布稀散或难于从原料中提取的金属。根据稀有金属的某些共同点（如物理化学性质等）又可将它们划分成 5 类 1)稀有轻金属　包括锂、铍、铷、铯和钛 5 种金属。它们的共同特点是相对密度小(0.53～4.5)，化学活性很强。这类金属的氧化物和氯化物都具有很强的化学稳定性，很难还原 2)稀有高熔点金属　包括钨、钼、钽、铌、锆、铪、钒和铼 8 种金属。它们的共同特点是熔点高（锆 1855～钨 3380℃），硬度大，抗腐蚀性强以及可与一些非金属生成高硬度和高熔点的稳定化合物，如碳化物、氮化物、硅化物和硼化物等。这些化合物是生产硬质合金的重要材料 3)稀土金属　包括镧系元素以及和镧系元素性质相近的钪和钇，共 17 个：钪、钇、镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕、钆、铽、镝、钬、铒、铥、镱和镥。稀土金属现已广泛用于配制新的合金钢种、铸铁和磁性材料 4)稀有放射性金属　指各种天然放射性元素：钋、镭、锕、钍、镤和铀以及各种人造超铀元素：钫、镭、镎、钚、镅、锔、锫、锎、锿、钔、锘和铹。天然放射性元素在矿石中往往是共同存在的。它们常常与稀土金属矿伴生。这类金属是原子能工业的重要原料 5)半金属　亦称类金属，包括硅、硒、碲、砷、硼 5 种元素。这些元素的物理、化学性质介于金属与非金属之间，如砷是非金属，但又能传热导电。此类金属根据各自特性，具有不同用途。硅是半导体主要材料之一；高纯碲、硒、砷是制造化合物半导体的原料；硼则是合金的添加元素。半金属不包括在上述的 81 种金属元素之内
有色金属合金	与黑色金属一样，有色金属也常以合金的形式在工业中应用，如铜合金、铝合金、钛合金、镁合金以及具有专门用途的轴承合金、印刷合金等

2 钢铁产品名称、用途、冶炼和浇铸方法的标准代号

2.1 常用化学元素符号

常用化学元素符号见表 3.1.1-3。

表 3.1.1-3　　常用化学元素符号表①

元素中文名称	国际化学符号	元素中文名称	国际化学符号
硼	B	铜	Cu
碳	C	锌	Zn
氮	N	锆	Zr
镁	Mg	铌	Nb
铝	Al	钼	Mo
硅	Si	镉	Cd
磷	P	锡	Sn
硫	S	锑	Sb
钛	Ti	镧	La
钒	V	铈	Ce
铬	Cr	钽	Ta
锰	Mn	钨	W
铁	Fe	铅	Pb
钴	Co	混合稀土元素	Xt
镍	Ni		

① 本表中元素按原子序排列

2.2 钢铁的分类

2.2.1 钢的分类

1)按化学成分分类

(1)碳素钢　钢中除铁外，主要含有碳、硅、锰、磷、硫等几种元素。碳素钢根据含碳量的不同，可分为：

低碳钢　含碳量<0.25%的钢。

中碳钢　含碳量在 0.25%～0.60%之间的钢。

高碳钢　含碳量>0.60%的钢。碳素钢根据本身含硫、磷量的多少又分为普通碳素钢（S<0.065%；P<0.085%）、优质碳素钢（S<0.045%；P<0.045%）和高级优质碳素钢（S<0.03%；P<0.035%）。

(2)普通低合金钢　在普通低碳碳素钢的基础上加入少量（一般总量不大于 3%）合金元素(如锰、硅、钒、铌、钛、稀土元素等)，使钢材的强度和综合机械性能明显提高，有时还可获得某些特殊性能；用它代替普通碳素钢可大大节约钢材。

(3)合金钢　钢中除含有铁、碳和少量不可避免的硅、锰、磷、硫元素以外，还含有适量的一种或多种合金元素。按所含合金元素的总量，合金钢可分为：

低合金钢　含合金元素总量小于 5%的钢。

中合金钢　含合金元素总量在 5%～10%的钢。

高合金钢　含合金元素总量大于 10%的钢。

合金钢也按硫磷含量分为优质钢（S<0.04%，P<0.04%）、高级优质钢（S<0.03%；

P<0.035%）和特级质量钢（S<0.025%；P<0.025%）。

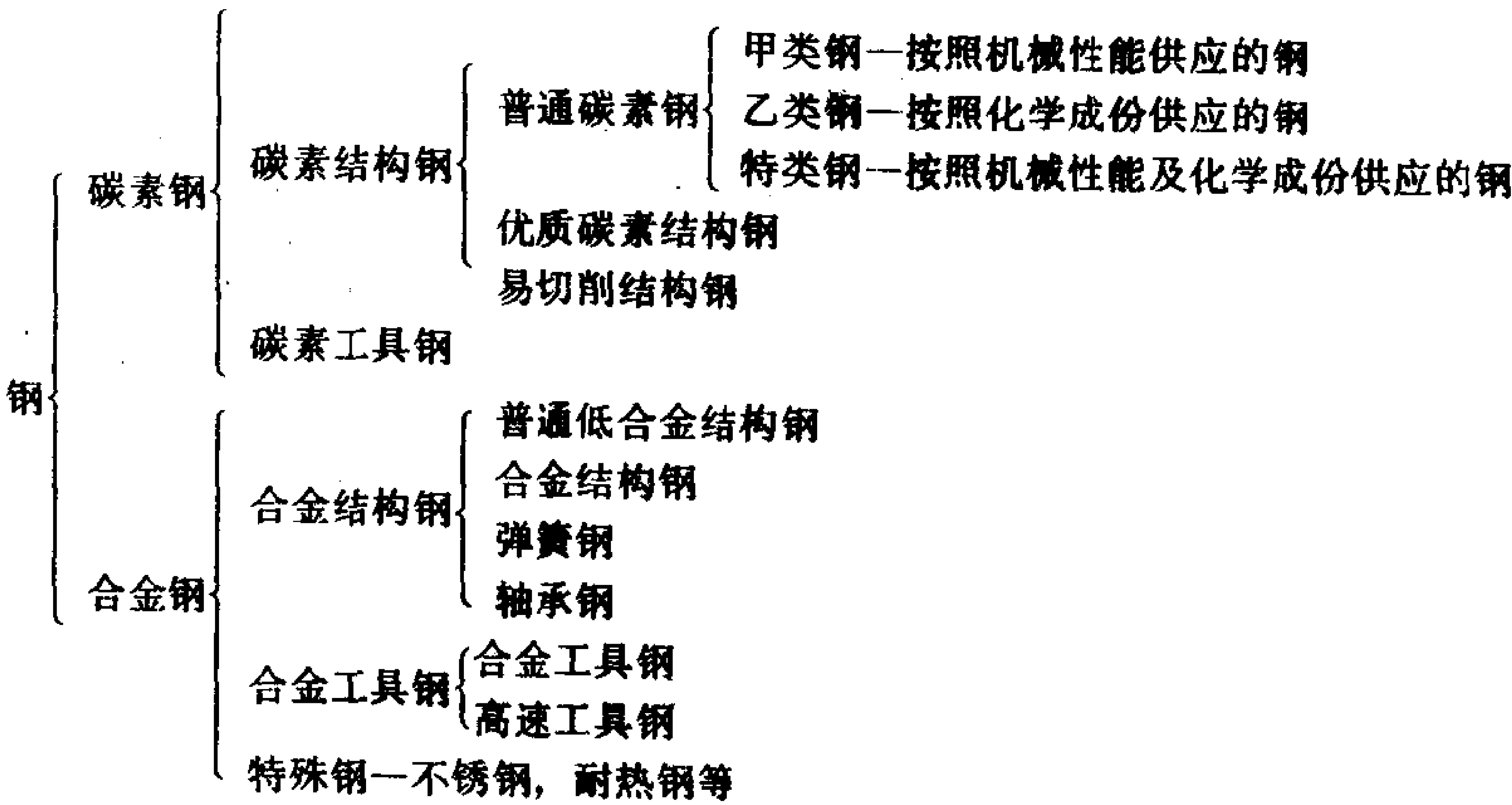
2)按用途分类

（1）结构钢　按用途不同，结构钢又分为建造用钢和机械用钢两类。

建造用钢　用于建造锅炉、船舶、厂房以及其它建筑。这类钢通常都要承受焊接加工，所以含碳量都不超过0.25%，多数经热轧和正火后使用。

机械用钢　用于制造机器零件。这类钢往往要经过渗碳或调质处理后才使用。

（2）工具钢　用于制造各种工具，包括碳素工具钢，合金工具钢和高速工具钢等。工具钢还可以按具体用途分为刃具钢、量具钢和模具钢。



（3）特殊钢　指具有特殊物理和化学性能因而有特殊用途的钢，如不锈钢、耐酸钢、耐热钢、磁钢等。

3)按冶炼方法分类

（1）转炉钢　由转炉生产的钢，主要是碳素钢和普通低合金钢。转炉钢分为底吹转炉钢、侧吹转炉钢和纯氧顶吹转炉钢。按炉衬材料又可分为酸性转炉钢和碱性转炉钢。原料主要是来自炼铁高炉的生铁铁水。

（2）平炉钢　由平炉生产的钢，主要也是碳素钢和普通低合金钢。按炉衬材料又分为酸性平炉钢和碱性平炉钢。炼钢原料为平炉生铁和废钢。

（3）电炉钢　由电炉生产的钢，主要是合金钢。它亦按炉衬材料分为酸性电炉钢和碱性电炉钢；按冶炼方法又分为电弧炉钢、感应电炉钢、真空感应电炉钢和电渣炉钢。目前工业上大量生产的主要是电弧炉钢，炼钢原料几乎全部是废钢。

4)按浇注前脱氧程度分类

（1）沸腾钢　是脱氧不完全的钢。脱氧后钢水中还剩有相当量的氧化亚铁（FeO），浇注时氧化亚铁和碳起作用形成一氧化碳气体，遂使钢水在钢锭模内呈沸腾现象，因而得名。沸腾钢钢锭上部没有缩孔，只是内部有许多分散的小气孔，但是钢锭外壳仍是坚实的；而这些分散小气孔在钢材轧制过程中可以完全被压合消除掉。沸腾钢的优点是钢锭利用率高，成本较低，具有良好的冷加工变形能力，因此常被用来轧制各种不同厚度的钢板；缺点是成分和

性能严重不均匀，强度和冲击韧性较低，容易时效硬化，不适宜在低温条件下使用。沸腾钢大都是普通低碳钢和优质低碳钢，用于制造一般零件或日用器皿。

（2）镇静钢　是脱氧完全的钢。由于钢水中氧很少，浇注时钢水平静，即没有碳和氧化亚铁作用而产生一氧化碳的沸腾现象，因而得名。它的优点是钢锭组织紧密坚实，化学成分和机械性能均匀，强度、冲击韧性都较高。缺点是钢锭上部有较深缩孔须切去，金属利用率较低，成本较高。除上述沸腾钢外，几乎所有钢种都属于镇静钢，主要用于制造重要的机器零件。

（3）半镇静钢　脱氧程度介于沸腾钢和镇静钢之间的钢。它兼有两者的优缺点，但生产上较难控制，故目前在钢的生产中所占比例较小。它的加工对象和应用范围与沸腾钢相同。

5)综合分类

2.2.2 铸铁的分类

将高炉生产的铸造生铁放入熔铁炉（冲天炉）重新熔炼，再按需要添加各种铁合金以获得具有一定化学成分的铸铁铁水，浇铸成形后即为铸铁零件，简称铸铁件。目前工业上生产的铸铁件有以下几类。

1)灰口铸铁　又称普通铸铁，是铸铁件中机械性能最差的一类。其特点是其中所含的碳全部或绝大部分以片状石墨的形式存在。如在浇铸前的熔融状态经过特殊处理以使片状石墨细化从而提高机械性能，则称为孕育铸铁或变质铸铁；应用稀土元素作为特殊处理的物质可使片状石墨变成蠕虫状，进一步提高了灰口铸铁的性能，这样的铸铁称为稀土高强度铸铁或蠕墨铸铁。

2)可锻铸铁　又称韧性铸铁，是通过高温热处理使白口铸铁件中的化合碳全部或大部分分解为呈团絮状的石墨态，从而使铸铁的塑性和韧性得到提高以扩大铸铁适用范围。所谓可锻是指塑性和韧性远较灰口铸铁为高而言，并非真可锻造。

3)球墨铸铁　铸铁件中的碳全部或大部分以球状石墨的形式存在，其机械性能可与铸钢媲美，而铸造性、减震性、耐磨性则优于铸钢。

4)特殊铸铁　即具有特殊性能的铸铁，如耐磨铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁等。为获得这些性能，可在普通灰口铸铁和球墨铸铁（有时也可在可锻铸铁）的基础上加入适量的合金元素如磷、铬、硅、铝、铌、钼以及稀土元素等。特殊铸铁均属合金铸铁。

2.3 钢铁产品名称、用途、特性和工艺方法命名符号

钢铁产品名称、用途、特性和工艺方法命名符号见表 3.1.1-4。

表 3.1.1-4　**钢铁产品名称、用途、特性和工艺方法命名符号表**

中文名称	采用的汉字和汉语拼音		代号	字体
	汉字	汉语拼音		
碱性平炉炼钢用生铁	平	Ping	P	大写
碱性空气转炉炼钢用生铁	碱	Jian	J	大写
顶吹氧气转炉炼钢用生铁	顶	Ding	D	大写
沸腾钢	沸	Fei	F	大写
半镇静钢	半	Ban	b	小写
易切削钢	易	Yi	Y	大写
氧气转炉（普通碳素钢用）	氧	Yang	Y	大写
碱性空气转炉（普通碳素钢用）	碱	Jian	J	大写

续上表

中文名称	采用的汉字和汉语拼音		代号	字体
	汉字	汉语拼音		
甲类钢	甲	—	A	大写
乙类钢	乙	—	B	大写
特类钢	特	—	C	大写
碳素工具钢	碳	Tan	T	大写
高级优质钢	高	Gao	A	大写
焊条用钢	焊	Han	H	大写
铆螺钢	铆螺	Mao Luo	ML	大写
滚动轴承钢	滚	Gun	G	大写
船用钢	船	Chuan	C	大写
锅炉钢	锅	Guo	g	小写
磁 钢	磁	Ci	C	大写
电器工业用硅钢	电	Dian	D	大写
电器工业用纯铁	电铁	Dian Tie	DT	大写
高频率（电工硅钢用）	高	Gao	G	大写
弱磁场（电工硅钢用）	弱	Ruo	R	大写
中磁场（电工硅钢用）	中	Zhong	H	大写
铸 钢	铸钢	Zhu Gang	ZG	大写
铸造生铁	铸	Zhu	Z	大写
灰口铸铁	灰铁	Hui Tie	HT	大写
球墨铸铁	球铁	Qiu Tie	QT	大写
可锻铸铁	可铁	Ke Tie	KT	大写
耐热铸铁	热铁	Re Tie	RT	大写
变形高温合金	高合	Gao He	GH	大写
铸造高温合金	高合	Gao He	K	大写

3 钢铁材料的分类、特点与牌号表示方法

钢铁材料的分类、特点与牌号表示方法见表 3.1.1-5。

表 3.1.1-5 **钢铁材料的分类、特点及牌号表示方法**

分类	牌号举例		说明	特点
	牌号	代号		
普通碳素钢 甲类钢	甲 1 甲 3 沸 甲碱 3 甲 3 半 甲氧 3	A 1 A3F AJ3 A3b AY3	甲类钢顺序号为 1 到 7，即A 1、A 2、……A 7，平炉钢不标出炉别，例如，“A 1”表示平炉冶炼的A类 1 号钢，余类推。转炉钢均须标出炉别，例如，AJ 3 表示碱性空气转炉冶炼的A类 3 号钢。钢号中标有“F”和“b”分别表示沸腾钢和半镇静钢。无标注的均为镇静钢，以下钢种均同此	甲类钢是按机械性能供应的，钢的序号越大反映强度值越高，而塑性和韧性则愈低。此类钢不经过热处理而直接使用
乙类钢	乙 1 乙 3 沸 乙 1 半 乙碱 3 半 乙氧 3 沸	B 1 B 3 F B 1 b BJ 3 b BY 3 F	乙类钢号为B 1、B 2、……、B 7。其余表示方法与甲类钢同。“BY3F”表示由氧气转炉炼出的 3 号乙类沸腾钢	乙类钢是按化学成分供应的，钢的序号越大反映含碳量越高。此类钢能满足用户的热处理要求

续上表

分　类	牌号举例		说　明	特　点
	牌　号	代　号		
特类钢	特 2 特碱 3 特碱 4 沸	C 2 CJ 3 CJ 4 F	特类钢号只有C 2、C 3、C 4、C 5 四种，其余表示方法与甲、乙类钢同	特类钢保证化学成分，同时又保证供应状态机械性能，钢的序号越大既反映含碳量越高同时也反映强度值越高
优质碳素钢	45 08 沸 50 锰 20 半	45 08 F 50 Mn 20 b	数字表示钢中平均含碳量的万分数。例如，“45”读作 45 号钢，钢中平均含碳量为 0.45%。优质钢中除少数低碳钢可冶炼成沸腾钢或半镇静钢外，其他钢号均为镇静钢。对含锰量较高的优质碳素钢（0.7%～1.2% Mn)，在钢号后标出“Mn”	优质碳素钢同时保证机械性能和化学成分，含有害杂质硫、磷少；钢的材质较好，主要用于制造各种较重要的机械零件，配合热处理可满足各种不同性能要求。
碳素工具钢	碳 7 碳 8 碳 8 锰 碳 9 高	T 7 T 8 T 8 Mn T 9 A T 8 MnA	为了避免同优质碳素钢的牌号雷同，用字母“T”代表碳素工具钢，含碳量以千分之几表示，含锰量较高的钢在钢号后均标出“Mn”。高级优质碳素工具钢的硫、磷含量比优质碳素工具钢低，为加以区别，在钢号后加注“A”，例如“T8MnA”	碳素工具钢的平均含碳量较高，约 0.7%～1.3%，热处理后可得到高硬度和高耐磨性，但热硬性差，刃部受热超过 200℃ 时硬度迅速下降，需用强烈冷却剂（如水）才能淬硬，俗称水钢，但淬火时易变形开裂，淬透性差
易切削钢	易 12 易 30 易 40 锰	Y 12 Y 30 Y 40 Mn	以平均含碳量的万分数表示，在数字前冠以“Y”表示易切削钢	这种钢含硫量较高，约 0.08%～0.3%，含锰约 0.60%～1.55%。钢中含有较多硫化锰，易使切削脆断，有利于提高加工表面的质量
普通低合金钢	16 锰 18 铌半 14 锰钒钛稀土	16 Mn 18 N_bb 14 MnV TiXt	数字表示钢中平均含碳量的万分数，钢中所含合金元素以代号（国际化学元素符号）标出，但不标明含量。例如“18 N_bb”表示该钢平均含碳量为 0.18%，钢中含有少量合金元素Nb，属于半镇静钢；“14 MnVTiXt”表示钢中分别含有少量合金元素锰、钒、钛和稀土元素	在普通低碳钢基础上加入少量合金元素。其机械性能高于低碳钢，焊接性、耐蚀性、耐磨性也略优于低碳钢，而成本与之相近或略高
合金结构钢	42 硅锰 40 硅锰 2 38 铬钼铝高 20 锰钛硼	42 SiMn 40 SiMn 2 38 CrMoAlA 20 MnTiB	钢号前面数字表示平均含碳量的万分数。钢中主要合金元素平均含量一般以百分数标注在元素符号之后；例如，当平均含量分别等于或大于 1.5%、2.5%、3.5%……时，应相应标出元素的含量百分数：2、3、4……。当合金元素的平均含量小于 1.5%时，钢号中只标出元素符号，不标数字。例如，钢号“40SiMn2”，表示平均含碳量为 0.40%，平均含硅量小于 1.5%，而平均含锰量等于或大于 1.5%。钢号末尾的“A”表示高级优质合金钢。 有些合金元素如钼、钒、钛、硼等，虽然它们的含量很低，但对钢的性能影响很大，所以这些元素如系特意加入的，即使含量甚微(例如硼)也应标出它们的元素符号。例如，钢号“20 MnTiB”，其中含锰量小于 1.5%，含钛量仅 0.09%，而含硼量甚至只有 0.0025%	钢中有目的地加入适量的(特别是匹配地加入)合金元素可有效地提高钢的综合机械性能、耐磨性、耐低温性能等；可改善其工艺性能，如淬透性、回火稳定性、切削性及可焊性等。可用非强烈冷却剂(如油)淬硬，与合金工具钢同，俗称油钢。其淬火变形及开裂倾向较碳钢小

分类	牌号举例		说明	特点
	牌号	代号		
弹簧钢	55硅2锰	55 Si 2 Mn	由于用量大,单独从合金结构钢中区分出来,其牌号表示方法与合金结构钢相同	弹簧钢应具有持久的弹性、高的屈服强度、疲劳强度和冲击韧性。一般弹簧通常用含碳量为0.6%~0.9%的优质碳素钢,如75.85。合金弹簧钢的含碳量为0.5%~0.75%
合金工具钢和高速工具钢	铬12 5铬镍钼 铬06 钨18铬4钒 钨9铬4钒2	Cr 12 5 CrNiMo Cr06 W 18 Cr 4 V W 9 Cr 4 V 2	合金工具钢中含有高碳量。钢号前面的数字表示平均含碳量的千分数,但当平均碳量不小于1.00%时,则数字不再标出。钢中合金元素含量的表示方法基本上与合金结构钢相同,只有含铬量例外。对含铬低的合金工具钢,其含铬量以千分数表示,并在含量之前加一个"0"字。例如"Cr06",表示含碳量不小于1.00%,含铬量为0.6%的合金工具钢 高速工具钢钢号中不标出含碳量,一般只标出合金元素平均含量的百分数,例如,"W 18 Cr 4 r"表示钢中平均含钨量为18%,含铬量为4%,含钒量小于1.5%。高速钢中含碳量都在0.7%以上	合金工具钢中常用合金元素有铬、硅、锰、钨、钼、钒等。它们的作用是提高钢的淬硬性、淬透性和耐磨性,并保持一定的冲击韧性。淬火剂与合金结构钢相同。淬火变形与开裂倾向较碳素工具钢小 高速钢除具有以上特点外,还有高的热硬性;当切削温度高达600℃时其刃部硬度仍无明显下降,故可用于高速切削。又因其具有很高的淬透性,能在空气中淬硬,也俗称风钢
滚动轴承钢	滚铬15 滚铬9 滚铬15硅锰	GCr 15 GCr 9 GCr 15 SiMn	滚动轴承钢为从结构钢中区分出来的专用钢种。它的含碳量不予标出,含铬量以千分数表示,钢号前面冠以表示用途的代号"G"。例如,"GCr 15"表示该钢号是平均含铬量为1.5%的滚动轴承钢。其它合金元素的表示方法与结构钢相同。滚动轴承钢的含碳量为0.95%~1.10%	滚动轴承钢必须具有高而均匀的硬度和耐磨性;足够的抗压强度和接触疲劳强度;足够的韧性和一定的耐蚀性
特殊合金钢	1铬13 2铬13 1铬18镍9钛 4铬14镍14钨2钼 铬17铝5	1 Cr 13 2 Cr 13 1Cr18Ni9Ti 4 Cr 14 Ni 14 W2Mo Cr 17 AL 5	这类钢的含碳量大都很低,一般在钢号中不标出,主要合金元素以百分数表示,而对钛、铌、氮等微量元素只标出它们的元素符号。如果含碳量不同,而合金元素含量相同时,为示区别,含碳量仍以千分数表示,如不锈钢"0Cr 13"、"1 Cr 13"、"2 Cr 13"等。如果含碳量较高,则仍以千分数标出,例如耐热钢"4 Cr 14 Ni 14 W 2 Mo"表示该钢平均含碳0.4%,含铬、镍、钨分别为14%、14%和2%,钼作为微量元素加入	加入适量的某些合金元素,如铬、镍、硅、钼、钨、铝等,使钢具有特殊性能。例如不锈钢、耐热钢、耐酸钢等
焊条钢	焊08高 焊0铬18镍9钛	H 08 A H0Cr18Ni9Ti	在相应的钢号前冠以代号"H",以便区别于其他钢类,例如"H0Cr 18 Ni9Ti"表示用作焊条的铬镍型不锈钢,以示与"0 Cr 18 Ni 9 Ti"相区别	这类钢专门供制造电弧焊和气焊焊条钢丝用。分碳素钢、合金结构钢和不锈钢3大类。这类钢的硫、磷含量低,化学成分控制严格,但不保证机械性能
铸钢 一般工程用铸造碳钢	铸钢200-400 铸钢270-500	ZG 200-400 ZG 270-500	在相应的钢号前冠以代号"ZG"。例如,"ZG 200-400"后面的数字,第一组代表屈服强度值,第二组代表抗拉强度值	形状复杂而机械性能要求较高的零件常用钢液直接浇注成形

分类	牌号举例		说明	特点
	牌号	代号		
合金结构钢铸件	铸钢 40 锰	ZG 40 Mn	在合金钢钢号前加ZG	例如低速大功率柴油机的气缸盖、曲轴以及船用螺旋桨等
专用钢 锅炉钢	20 锅 22 锅 甲 3 锅 15 锰钒锅	20 g 22 g A 3 g 15 MnVg	专用钢的表示方法是在相应的普通碳素钢、优质碳素钢或合金钢的钢号末尾加注一表示用途的代号，如“g”，“C”等	锅炉用钢主要是指用来制造过热器、蒸汽管、炉胆等的钢材，故必须具备良好的塑性和焊接性，一定的高温强度和耐碱性腐蚀、耐氧化等
船用钢	1 船 2 船 3 船 4 船 15 锰钒船 10 锰磷铌 稀土船	1 C 2 C 3 C 4 C 15 MnVC 10 MnPNb XtC	船用优质碳素钢的表示方法与上述略有不同。热轧后的钢板共分 1 C、2 C、3 C、4 C四种。“C”表示“船”，数字是顺序号，钢种的抗拉强度随顺序号的增大而略有提高；它们的含碳量均小于或等于 0.22%，但含锰量有区别 船用普通低合金钢的表示方法与上述相同，即在相应的钢号后加注一用途代号“C”	船用钢是用来制造海船和大型内河船舶的船体结构用钢，故必须具备良好的塑性和焊接性，一定的强度、韧性和耐低温及耐腐蚀的性能
铸铁 灰口铸铁	灰铁 100 灰铁 250	HT 100 HT 250	灰口铸铁以代号“HT”表示，后面的数字表示最低抗拉强度。例如“HT 250”表示该铸铁的最低抗拉强度为 250 MPa	灰口铸铁铸造性、消震性、减摩性优良、价格低廉、但抗拉强度较低，几无塑性和韧性，主要用于制造形状复杂、但承受静压载荷或较低动载荷的零件，如机架、底座、气缸体、箱体以及皮带轮、飞轮等。某些高强度及合金灰口铸铁则也可用于铸造气缸套和活塞环等重要零件
可锻铸铁	可铁黑 300-06 可铁珠 450-06 可铁白 400-05	KTH 300-06 KTZ 450-06 KTB400-05	可锻铸铁以代号“KT”表示，基体组织为珠光体的可锻铸铁以“KTZ”表示。其后的数字亦表示机械性能。第一组数字是最低抗拉强度，第二组数字是最低延伸率，例如“KTZ 450-06”表示该珠光体可锻铸铁的最低抗拉强度为 450 MPa，最低延伸率为 6%	可锻铸铁具备了一定的塑性和韧性，可用于承受冲击和振动的场合，如锅炉及船舶管系零件等
球墨铸铁	球铁 40-17 球铁 60- 2	QT 40-17 QT 60- 2	球墨铸铁以代号“QT”表示。其后两组数字的含义与可锻铸铁相同	球墨铸铁(特别是合金球墨铸铁)的某些机械性能已接近甚至超过碳钢和某些合金结构钢，同时仍保留其优良的工艺性能和低廉价格。在船舶工业中已用于铸造受力复杂而强度、韧性和耐磨性要求均较高的零件，如链轮、齿轮和中、小型柴油机的活塞、曲轴等
特殊铸铁	蚀铁硅-15 热铁铬-1.5 热铁硅-5.5	STSi-15 RTCr-1.5 RTSi-5.5	特殊铸铁重点标出主要合金元素平均含量如 RTCr-1.5 表示含量为 1.5%的耐热铸铁	适用于特定的工作环境和技术条件

4 常用有色金属及合金产品的代号

4.1 常用有色合金举例

常用有色金属及合金产品的代号见表 3.1.1-6。

表 3.1.16 常用有色合金的名称、特点和用途

名称				特点和用途
铜合金	黄铜	经铸造或压力加工	普通黄铜(铜锌合金)	具有良好的塑性和铸造性，可加工成板、带、棒、管等型材。黄铜具有比一般钢铁高得多的耐蚀性，故可用于制造接触淡水、海水和蒸汽的零件；由于它和有机氟化物不发生反应，故亦可用作以氟化物为制冷剂的冷冻设备的零件
			特殊黄铜(举例)：锡黄铜	有极好的耐蚀性和较高的机械性能，用于造船业热工设备，如接触海水的热交换器和冷凝器等
			锰黄铜	有耐蚀性，可制造在大气和海水条件下工作的零件和300℃以下工作的蒸汽系统管配件，如船用小型螺旋桨、蒸汽泵活塞等
			硅黄铜	高耐蚀性，良好铸造和压力加工性能。可用于制造船舶耐蚀零件，蒸汽系统配件和在摩擦条件下工作的零件，如轴承衬套等
			铝黄铜	有高强度和韧性，耐磨性、耐蚀性均好，可用于制造海船螺旋桨和其他耐蚀零件，如冷凝器管子等
			铁黄铜	用于制造各种高强度和耐蚀管材、板材和螺旋桨轴套、活塞杆、衬套等
			锡青铜(铜锡合金)	锡青铜的强度较黄铜低，但耐蚀性高于纯铜和黄铜，在淡水、海水、潮气、蒸汽中都有很好的抗蚀能力。此外，它还具有优良的耐磨性、可用于制造各种热工设备和船舶零件以及受强烈摩擦的零件如蜗轮、轴套等
			特殊青铜(无锡青铜)铝青铜	耐蚀性和耐磨性均超过锡青铜，强度和韧性与钢接近，且可经过热处理强化。可用于代替锡青铜制造各种高强度、高速、耐蚀、耐磨的零件，如蜗轮等
			铍青铜	除有良好的耐蚀性外，具有高的强度和弹性极限，并可经过热处理强化。主要用作精密弹簧和高速止回阀阀片
			锰青铜	强度高、耐蚀性好。船舶工业中用于制造螺旋桨及其它特殊零件
			硅青铜	能承受冷、热压力加工，具有高的弹性，可用于制造在腐蚀介质(海水等)中工作的各种弹簧
	白铜	经压力加工	普通白铜(铜镍合金)	白铜具有高的电阻系数，低的电阻温度系数，高的抗高温氧化能力；它有适当的强度，弹性和良好的耐蚀性。可用于制造电阻，弹性元件和冷凝器管件
			特殊白铜：锰白铜、锌白铜、铁白铜等	在普通白铜的基础上加入锰、锌、铁等元素而成为特殊白铜。其目的是提高抗拉强度和改善电气性能。特殊白铜广泛用于精密机械、船舶及电器仪表中耐蚀零件材料

<table>
<tr><th colspan="4">名　称</th><th>特　点　和　用　途</th></tr>
<tr><td rowspan="4">铝合金</td><td rowspan="4">形变铝合金</td><td>不经热处理</td><td>防锈铝(铝镁合金、铝锰合金)</td><td>强度比纯铝提高一倍以上，可采用冷压力加工强化。具有适中强度，良好塑性，高的耐蚀性，表面常保持光亮。其焊接性能优良，故可用于制造海船焊接构件，如围壁、散热器，油水管路以及舱面属具等</td></tr>
<tr><td rowspan="3">经热处理</td><td>硬铝(铝铜镁合金)</td><td>此类合金的强度为纯铝的 3 ～ 5 倍，可用作舰艇及民用船舶上层建筑的构件和铆钉材料、船用家俱、装饰物等</td></tr>
<tr><td>超硬铝(铝锌铜镁合金)</td><td>强度超过硬铝，大都用于航空工业作为形状复杂的高强度锻件</td></tr>
<tr><td>锻铝(铝镁硅合金)</td><td>经过锻造成形，用于制造形状复杂的锻件和模锻件，如压汽机和风扇叶轮，内燃机活塞、气缸头等</td></tr>
<tr><td rowspan="4"></td><td rowspan="4">铸造铝合金</td><td rowspan="4">经热处理</td><td>铝硅合金(硅铝明)</td><td>此合金系列的铸造性能、切削性能都较好，应用广泛。大都用于铸造形状复杂的零件，如内燃机活塞、气缸盖、机体、增压器外壳等</td></tr>
<tr><td>铝铜合金</td><td>强度较高，铸造性稍差，可用作受载大而形状不复杂的零件；可在 300℃以下工作</td></tr>
<tr><td>铝镁合金</td><td>强度和塑性高，耐蚀性优良。可用于制造在海水环境下承受较大负荷的铸件，如海水泵壳体、低压阀件等</td></tr>
<tr><td>稀土铝合金</td><td>近年来开发的新材料，高温性能好，加工工艺简便，可用作在高温下长期承受气压、液压的柴油机零件</td></tr>
<tr><td>钛合金</td><td colspan="3">按内部组织的不同，分成α型、β型和$\alpha+\beta$型三类。应用较广的为α、$\alpha+\beta$二类</td><td>钛和钛合金的突出优点是具有金属中最高的比强度，优良的高温和低温机械性能和超常的耐腐蚀性能（不受氯化物、硫化物、硝酸、强碱甚至冷王水的腐蚀）
钛及钛合金已用于制造舰艇壳体，高速柴油机活塞、连杆、增压器涡轮叶盘、叶片、海底阀等。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">轴承合金</td><td rowspan="2">巴氏合金(白合金)</td><td colspan="2">锡基轴承合金(锡锑铜合金)</td><td>属于软基体硬支点结构滑动轴承材料。摩擦系数小，耐磨性、导热性、塑性均好。缺点是疲劳强度低，工作温度超过 60℃时强度和疲劳强度迅速下降。此合金广泛用于船用低速和中速柴油机主轴承、曲柄销轴承和十字头轴承以及船舶轴系中间轴轴承等</td></tr>
<tr><td colspan="2">铅基轴承合金(铅锑锡铜合金)</td><td>亦属于软基体硬支点结构滑动轴承材料，性能不及锡基轴承合金，但因含锡量少，成本较低。一般用作中、低载和低速机器的轴瓦材料，如船用离心泵和各种甲板机械的轴承等</td></tr>
</table>

续上表

名称		特点和用途
	铜基轴承合金(铜铅合金)	属于硬基体软支点结构的滑动轴承材料，优点是疲劳强度高，承载能力大，铅具有自润滑性，故减摩性好。工作温度可达到300℃，因此适用于高速大功率柴油机和其他高速高载的重要轴承。为了防止新轴承咬合和改善磨合性，常在铜铅合金表面镀复一层软质合金(铅锡或铅铟合金) 和铜基合金偶配的钢轴表面必须具有高硬度，即应经过表面淬火或化学热处理
	铝基轴承合金(高锡铝合金)	具有更高的承载能力和疲劳强度，可以代替铜基轴承合金，是当代较理想的一种柴油机轴承材料，已广泛用于高速柴油机轴承。 铝基轴承合金亦属于硬基体软支点结构，和它相偶配的钢轴亦必须具有高的表面硬度
硬质合金	钨钴合金 钨钴钛合金 碳化钛基合金 钢结硬质合金	具有特高的硬度(HRC 80以上)和热硬性(低于1000℃)。钨钴合金主要用作加工铸铁和有色金属的切削工具；钨钴钛合金主要用作加工各种钢材的切削工具；碳化钛基合金刀具主要用于硬钢的连续切削精加工；钢结硬质合金本身可被机械加工，主要用于制造各种模具和形状复杂的切削工具

4.2 常用有色金属及合金产品代号

常用有色金属及合金产品代号见表3.1.1-7。

表3.1.1-7 常用有色金属及合金产品代号

名称	汉语拼音代号	名称	汉语拼音代号
铜	T	超硬铝	LC
铝	L	特殊铝	LT
镁	M	涂料铝粉	FLU
镍	N	钛及钛合金	T
金属粉末	F	钨钴硬质合金	YG
喷铝粉	FLP	钨钴钛硬质合金	YT
黄铜	H	通用硬质合金	YW
青铜	Q	碳化钛基硬质合金	YN
白铜	B	钢结硬质合金	YE
防锈铝	LF	轴承合金	Ch
锻铝	LD	铸造合金	Z
硬铝	LY		

4.3 有色金属及合金的产品状态代号

有色金属及合金的产品状态代号见表 3.1.1-8。

表 3.1.1-8 **有色金属及合金的产品状态代号**

产品状态	汉语拼音代号	产品状态	汉语拼音代号
热加工	R	优质表面淬火自然时效	CZO
退火（焖火）	M	优质表面淬火人工时效	CSO
淬　火	C	加厚包铝的①	J
淬火后冷轧（冷作硬化）	CY	不包铝的	B
淬火，自然时效	CZ	不包铝、热轧	BR
淬火，人工时效	CS	不包铝，退火	BM
硬	Y	不包铝、淬火、冷作硬化	BCY
3/4硬、1/2硬	Y_1、Y_2	不包铝、淬火、优质表面	BCO
1/3硬、1/4硬	Y_3、Y_4	不包铝、淬火，冷作硬化优质表面	BCYO
特　硬	T	淬火后冷轧，人工时效	CYS
优质表面	O	热加工、人工时效	RS
优质表面、退火	MO	淬火、自然时效，冷作硬化，优质表面	CZYO

① 硬铝的耐蚀性差，特别在海水中尤甚，硬铝产品外表面通常包有一层纯铝以作防护。如加厚包铝或不包铝则都应注明。

4.4 有色合金牌号表示方法

有色合金牌号表示方法见表 3.1.1-9。

表 3.1.1-9 **有色合金牌号表示方法**

合金名称	牌号举例	牌号表示方法说明
黄　铜	H62、H68 HPb59-1 HSn62-1 HMn58-2 HAl60-1-1 ZHMn55-3-1	普通黄铜的表示方法是汉语拼音字母“H”加基本元素铜的含量，而三元以上的黄铜(特殊黄铜)是汉音拼音字母“H”加第二个主添加元素符号及除锌以外的成分数字组，例如，“H62”表示含62%铜的普通黄铜，其余为锌；“HAL60-1-1”表示该特殊黄铜的主添加元素为铝，含铜 60%，含铝1%，另一辅添加元素含量亦为1%，但其元素符号省略。前面加“Z”表示铸造黄铜，无Z为压力加工黄铜
青　铜	QSn4-3 QSn4-4-4 QAl10-3-1.5 ZQSn-6-6-3	青铜的表示方法是汉语拼音字母“Q”加第一个主添加元素符号及除基本元素铜外的成分数字组，例如，“QSn4-4-4”表示该青铜含主添加元素锡4%（故称锡青铜），其余两辅添加元素的含量亦分别为4%和4%，但它们的元素符号省略，前面加Z表示铸造青铜，无Z为压力加工青铜
白　铜	B16 BMn3-12 BAl6-1.5	普通白铜的表示方法是汉语拼音字母“B”加含镍量，而特殊白铜(三元以上)是汉语拼音字母“B”加第二个主添加元素符号及除基本元素铜外的成分数字组，例如“BMn3-12”表示该特殊白铜为锰白铜，其中含镍3%含锰 12%
形变铝合金	LF2、LF10 LY1、LY8 LD2、LD9 LC4	形变铝合金的表示方法是汉语拼音字母加顺序号。例如，“LF”、“LY”、“LD”、“LC”分别表示“防锈铝”、“硬铝”、“锻铝”和“超硬铝”，其后的数字均为顺序号

续上表

合金名称	牌号举例	牌号表示方法说明
铸造铝合金	ZL102、ZL108、ZL110、ZL201、ZL203、ZL301、ZL302	铸造铝合金的表示方法是汉语拼音字母加数字编号，第一位数字表示主添加元素的编号："1"——铝硅基合金；"2"——铝铜基合金；"3"——铝镁基合金。后二位数字表示各合金系列的顺序号"Z"表示"铸"
钛及钛合金	TA1、TA5、TA8、TB2、TC1、TC5、TC10	钛及钛合金按α、β，$\alpha+\beta$三种内部组织类型分别以TA、TB、TC表示；其中TA 1、TA 2和TA 3为工业纯钛，其余牌号均为钛合金，末尾数字为顺序号
轴承合金（白合金）	ZChSnSb11-6 ZChPbSb15-5-3	轴承合金的表示方法是汉语拼音字母加二个基本元素符号及成分数字组。第一位数字表示第二个基本元素的含量百分数，后二位数字为另二个添加元素含量百分数，但元素符号省略，"Z"表示"铸"
硬质合金	按化学成分和用途分为： 钨钴(WC-Co)合金 YG4C、YG6X、YG10H、YG6A、YG8N 钨钛钴（WC-Ti-Co）合金 YT5、YT30 钨钛钽（铌）钴合金 〔WC-TiC-TaC（NbC）-Co〕 YW 3、YW 2 钢结硬质合金① GT35、R5、TI 碳化钛基硬质合金 YN10、YN05	Y——硬质合金汉语拼音字头； G——钴，其后数字表示合金中的含钴量； C——粗晶粒合金； X——细晶粒合金； T——钛，其后数字表示合金中TiC含量； A——含TaC(NbC)的钨钴类合金； W——表示含TaC(NbC)的钨钛钽钴合金； N——代号前的字母N表示不含钴的镍钼作胶结剂的碳化钛基硬质合金，代号后的字母表示含少量碳化钽（铌）的钨钴合金

① 钢结合金系暂用代号。

5 金属材料的常用物理和机械性能指标

5.1 常用物理性能指标

金属材料常用物理性能指标见表 3.1.1-10，密度、熔点和线膨胀系数见表 3.1.1-11。

表 3.1.1-10 **常用物理性能指标**

指标名称	符号	单位	计算公式	说明
密度	ρ	g/cm³	$\rho=\frac{m}{v}$ 式中：m——物质的质量，g； v——物质的体积，cm³	密度是指物质或物体的质量密度，即单位体积的质量。由于体积是随温度变的，严格地表示密度值时，应交代温度。另外，对于某些固体物质的密度有两种情况须区分，一是不包括其中的空洞与空隙，另一是把它们算在内的，都称为密度，例如某些烧结材料。在给出密度时必须说明是否包括空洞等部分
熔点	—	℃		物质从固态向液态转变时的温度称为熔点。金属及合金可按熔点的不同分成易熔和难熔金属两大类。工业上一般把熔点低于 700℃的金属叫做易熔金属，如Sn、Pb、Zn、Mg和Al等；熔点高于 700℃的为难熔金属，如W、Mo、V等

指标名称	符号	单位	计算公式	说明
导热系数	λ	W/(m·K) J/(m·s·K)	$\lambda=\frac{1}{A}\cdot\frac{Q}{t}$、$\frac{\Delta L}{\Delta T}$ 式中：A——单位横截面积，m^2； Q——热量，J； t——单位时间，s； $\frac{\Delta L}{\Delta T}$——单位温度梯度，m/K	维持单位温度梯度时，在单位时间内流经物体单位横截面积的热量称为该物体的导热系数。导热系数大的材料反映它的导热性好，关于各种常用工程材料的导热系数可查本手册传热学部分
线膨胀系数	α	$℃^{-1}$	$\alpha=\frac{1}{\Delta T}\cdot\frac{\Delta L}{L}$ 式中：ΔT——温度的变量，℃； ΔL——相应ΔT的长度变量，m； L——物体的原长度，m	在一定的温度范围内，金属各个线度（如矩形梁的长、宽、高）的变化与温度的变化成正比。这种膨胀叫线性膨胀。在线性膨胀范围内，金属材料的温度每升高1℃时，其线度的伸长量与其在0℃时的线度之比叫做金属材料的线膨胀系数。在计算体积膨胀系数时必须注意，它等于线膨胀系数的3倍
电导系数	γ	m/(Ω·mm²)	$\gamma=\frac{l}{RS}=\frac{1}{\rho}$ 式中：l——导体长度，m； R——导体电阻，Ω； S——导体横载面面积，mm^2； ρ——电阻系数，$\rho=\frac{1}{\gamma}$，$\Omega\cdot mm^2/m$	电导系数是反映导体导电能力的性能指标。它在数值上等于维持单位电位差时流经导体单位面积的电流。电导系数的倒数即为电阻系数。电导系数越大，电阻系数就越小，材料的导电能力就越高。在金属中，以银的导电性为最好，其次是铜、金，所以工业中有时也以银为标准导电材料，把它的电导系数规定为1，其它金属材料的电导系数与其比值就定为该材料的相对电导系数，如铜为95%，铝为60%
导磁率	μ	H/m	$\mu=B/H$ 式中：B——磁感应强度，T； H——磁场强度，A/m	金属材料在磁场的作用下会反映出不同的磁化性能，可分成3类： 铁磁性材料　在外加磁场中，能强烈地被磁化到很大程度，如铁、钴、镍、钆等 顺磁性材料　在外加磁场中，只是微弱地被磁化，如锰、铬、钼等 抗磁性材料　即抗拒或削弱外加磁场对材料本身的磁化作用，如铜、金、银、铅、锌等 根据使用要求，铁磁性材料又有软磁材料和硬磁材料之分：易充磁又易退磁且反复充退不易发热的材料如硅钢片(旧称矽钢片)，属于软磁材料，导磁率是衡量材料磁化难易程度的性能指标，所以通常用于评定软磁材料的质量。导磁率μ越大，说明在外加磁场H作用下，材料的磁感应强度B越大，亦即材料对磁场的加强作用越大。现代高级软磁材料的导磁率μ值已达百万H/m之巨。硬磁材料的性能正与软磁材料相反，不易充磁也难于退磁；当充磁的外加磁场撤去后，材料本身仍保留很高的磁性，且不易消除。所以，硬磁材料又称永久磁铁（俗称吸铁石），常用于直流发电机、电话机、扩音装置等
矫顽力（或称矫顽磁力）	M_C	A/m	——	矫顽力M_C是评定硬磁材料的性能指标之一，它表示消除永久磁铁的磁性（顽磁性）所必须施加的反向外磁场的磁场强度，M_C越大，说明永久磁铁的磁性越持久

表 3.1.1-11　　**常用金属及合金的密度、熔点和线膨胀系数**

名称或牌号	化学成分（%）	密度（g/cm³）	熔点（℃）	线膨胀系数 ×10⁻⁶/℃（20℃）
铝 Al	纯	2.70	660	23.1
镉 Cd	纯	8.65	320.9	29.8
钴 Co	纯	8.9	1495	12.5
铬 Cr	纯	7.19	1855	6.2
铜 Cu	纯	8.94	1083	16.6
铁 Fe	纯	7.86	1539	11.7
镁 Mg	纯	1.74	650	25.7
锰 Mn	纯	7.43	1245	23.0
钼 Mo	纯	10.2	2622	4.9
镍 Ni	纯	8.9	1455	13.5
铅 Pb	纯	11.34	327.5	29.1
锑 Sb	纯	6.69	630.5	11.4
锡 Sn	纯	7.3	232	23.0
钛 Ti	纯	4.50	1660	9.0
钒 V	纯	6.1	1919	8.3
钨 W	纯	19.3	3410	4.3
锌 Zn	纯	7.14	419.4	33.0
锆 Zr	纯	6.4	1700	——
硼① B	纯	2.34	2300	8.0
硅① Si	纯	2.33	1440	4.2
碳② C（钻石）	纯	3.51	3600	1.18
碳② C（石墨）	纯	2.26	3600	6.6
硫② S	纯	2.06	112.8	67.5
磷② P	纯	1.83	44.1	125.0
超硬铝	Cu 3.8~4.8 Mg 1.2~1.8 Mn 0.4~1.0 Fe<0.6, Si<0.6 Al 余量	2.8	约650	22.8（退火） 23.2 （固溶后时效）
硬　铝	Cu 4.0 Mg 0.5 Mn 0.5 Al 余量	2.79	约 650	22.6
硅铝明	Si 11~14.5 Fe<0.7	2.65	575~585	19.8~21.2
黄　铜 H70	Cu 69.0~72.0 Zn 余量	8.54	950	19（0~100℃）
黄铜H59	Cu 57.0~60.0 Zn 余量	8.39	905	18.4（100℃）
锰黄铜	Mn 3.5 Al 5.5 Fe 3.0 Zn 26 Cu 余量	7.9	899	19.8（21~260℃）
铝青铜	Al 9~10 Mn≤0.6 Fe≤0.25 Cu 余量	7.6	1040	17（0~100℃）

① 半金属。
② 非金属。

续上表

名称或牌号	化学成分（%）	密度（g/cm³）	熔点（℃）	线膨胀系数 ×10⁻⁶/℃（20℃）
磷青铜	Sn 10 P 0.03～0.25 Cu 余量	8.78	1000	18.4（20～300℃）
白合金（巴氏合金或锡基轴承合金）	Sn 80～90 Sb<10 Cu 2～7	7.38	355～240	约 20
特软钢	C<0.08	7.859	1500	11.60
软　钢	C 0.12～0.20	7.855～7.863	1470～1490	11.16～11.28
中碳钢	C 0.40～0.50	7.836～7.846	1390～1420	10.72～10.73
高碳钢	C 0.80～1.6	7.810～7.833	1335～1450	9.58～10.87
铸　钢	C 0.2～0.5 Mn 0.7 Si 0.4 P, S<0.04	7.84	1410～1470	从 1600℃总收缩11.8%
可锻铸铁	C 2.5～2.6 Si 1.0 Mn 0.4	7.35	约1130	11.55
灰口铸铁	—	7.05～7.30	1145～1275	9.2～11.80
球墨铸铁	C 3.2～4.0 Mn<0.8 Si 1.8～3.0 Mg 处理	7.1	1120～1180	10.0
铬渗碳钢	C 0.09～0.25 Cr 0.55～1.5	约7.84	—	约11.2（20～100℃） 约14.3（20～600℃）
铬不锈钢	C<0.2 Mn<0.5 Cr 11～15 Ni<1.0	7.6～7.75	1510～1532	11.0（0～100℃）
铬镍不锈钢	低碳 Cr18Ni8 （习称18-8型）	7.91	1400～1420	17.1（0～100℃） 18.4（0～500℃）

5.2 常用机械性能指标

金属材料常用机械性能指标见表 3.1.1-12

表 3.1.1-12　　**常用机械性能指标**

指标名称	符　号	单　位	计　算　公　式	说　　　明
正弹性模数	E	Pa	$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}$ 式中：σ——正应力，Pa； ε——应变，%	金属在弹性范围内，外力和变形成正比，其比例系数就是弹性模数。
剪切弹性模数	G	Pa	$G=\frac{\tau}{\gamma}$ 式中：τ——切应力，Pa； γ——相应的扭转应变	剪切弹性模数G反映材料抗衡扭转变形的刚度 弹性模数主要决定于金属材料本身，与其他强化金属材料的手段（如热处理，合金化，冷热加工等）无关。因此，弹性模数是金属材料最稳定的性能之--

指标名称	符号	单位	计算公式	说明
强度极限	σ	MPa	$\sigma=\frac{P}{F}$ 式中：P——最大负载，N； F——试样横截面积，mm^2	金属受外力作用，在断裂前单位面积上所能承受的最大负载
抗拉强度极限	σ_b	MPa	$\sigma_b=\frac{P_b}{F}$ 式中：P_b——最大拉力，N； F——试样横截面积，mm^2	外力是拉力时的强度极限，它是工程上最常用的材料性能指标
抗压强度极限	σ_{bc}或σ_y	MPa	$\sigma_y=\frac{P_y}{F}$ 式中：P_y——最大压力，N； F——试样横截面积，mm^2	外力是压力时的强度极限。压缩试验主要适用于低塑性材料，如铸铁、木材、塑料等
抗弯强度极限	σ_{bb}或σ_w	MPa	$\sigma_w=\frac{M}{W}$ 式中：M——最大弯曲力矩，N·mm； W——试样截面系数，mm^3	外力引起材料弯曲破坏时的强度极限。此指标主要用于脆性材料，如灰口铸铁
屈服强度（屈服极限）	σ_S	MPa	$\sigma_S=\frac{P_S}{F}$ 式中：P_S——屈服载荷，N； F——试样横截面积，mm^2	屈服极限是指金属材料产生微量塑性变形时的应力，某些材料（如低碳钢和低碳合金钢）在拉伸试验中产生较明显的“屈服”现象，此时虽然载荷不再增加，但试样仍继续变形，产生此现象时的应力即为屈服强度或称屈服点
条件屈服强度	$\sigma_{0.2}$	MPa	$\sigma_{02}=\frac{P_{0.2}}{F}$ 式中：$P_{0.2}$——试样产生0.2%塑性变形时的载荷，N； F——试样横截面积，mm^2	对于大多数金属材料，在拉伸试验时并无明显的屈服现象，σ_S很难测定。因此，在工程实践中，通常把塑性变形量为拉伸试样标准长度的0.2%时的应力值规定为条件屈服强度，用$\sigma_{0.2}$表示。$\sigma_{0.2}$容易测定，比σ_S用得更为普遍，它是选用金属材料制造机器零件所依据的最重要的强度指标
蠕变极限	$\sigma_{\dot{\varepsilon}}^{T}$ 其中： T——温度，℃ $\dot{\varepsilon}$——变形速度，%/h	MPa	由实验测定	金属在长时间的恒温、恒应力作用下，即使应力小于屈服强度，也会缓慢地产生塑性变形的现象称为蠕变，蠕变在低温时(碳钢在300℃以下，合金钢在400℃以下)不明显，但在高温时必须引起重视，和常温下的屈服强度$\sigma_{0.2}$相似，蠕变极限是高温长期载荷作用下材料产生规定的微量塑性变形时的应力值。 例如$\sigma_{\dot{\varepsilon}}^{T}=\sigma_{1\times10^{-5}}^{600}=60$MPa表示在温度为600℃时，蠕变速度为$1\times10^{-5}$%/h的蠕变极限为60 MPa；亦可理解为材料在600℃温度下，10万h后变形量为1%的蠕变极限为60 MPa

续上表

指标名称	符号	单位	计算公式	说明
持久强度	σ_t^T 其中： T——温度，℃； t——时间，h	MPa	由实验测定	高温长期载荷作用下的持久强度，和常温下的强度极限σ_b相似，它是在规定的温度T下，恰好使材料经过规定时间t发生断裂的应力值。例如$\sigma_t^T=\sigma_{1\times10^3}^{700}=300$MPa表示材料在700℃下经1000 h后断裂的持久强度为300 MPa 蠕变极限和持久强度是设计汽轮机锅炉等动力设备中耐高温零件时所依据的重要性能指标
伸长率（延伸率）	δ δ_5 δ_{10}	%	$\delta=\frac{L_1-L_0}{L_0}\times100\%$ 式中：L_1——试样拉断后的长度，m； L_0——试样原来的长度，m	金属试样经拉伸试验被拉断后，其标距部分因塑性变形面增加的长度与原标距长度的比值，称为伸长率（延伸率）。伸长率δ的大小与试样的长度有关。通常为δ_5和δ_{10}二种试样。δ_5是试样标距长度为其直径5倍时的伸长率；δ_{10}是相应为10倍时的伸长率，通常δ即指δ_{10}
断面收缩率	ψ	%	$\psi=\frac{F_0-F_1}{F_0}\times100\%$ 式中：F_1——试样断裂处的横截面积，mm² F_0——试样原来的横截面积，mm²	试样拉断后其断裂处横截面积的缩小量与原来横截面积的比值，称为断面收缩率 δ和ψ都可反映材料产生塑性变形的能力，是制订压力加工工艺的依据，同时，它们亦可间接反映出材料的脆性倾向，一般认为，$\delta<5\%$的材料是脆性材料
布氏硬度	HB	MPa	$HB=\frac{p}{F}$ $=\frac{2p}{\pi D(D\sqrt{D^2-d^2})}$ 式中：p——钢球上的载荷，kgf①； F——压痕表面积，mm²； D——钢球直径，mm d——压痕直径，mm	金属的硬度是指其表面抵抗其它更硬物体压入的能力，也就是表面承受局部塑性变形的抗力。 用淬硬小钢球（直径为10，5或2.5 mm）压入金属表面，以其压痕面积除加在钢球上的负载（一般为3 000，1 000，750，250，187.5，62.5或15.6 kgf①）所得之商，即为金属的布氏硬度值。布氏硬度只适用于测定硬度值HB<450的金属材料。对于太薄或者已经精加工的零件，其表面不允许有较大压痕，因此也不宜采用此法。
洛氏硬度	HRA HRB HRC	无	$HR=\frac{K-h}{0.002}$ 式中：K——常数，HRC和HRA的K值为0.2 mm；HRB的K值为0.26 mm； h——压痕深度，mm	洛氏硬度一般是用来试验硬度超过HB450的材料，其测量原理与布氏硬度基本相同，但洛氏硬度值的测定是以试样被测点的压痕深度为依据，压痕越深，硬度越低。洛氏硬度值规定以符号HR表示，根据压头形式和载荷大小分别以HRA，HRB和HRC表示。用120°角圆锥形的金刚石压头和150 kgf（≈1500 N）负载测定的硬度称为HRC；压头不变，载荷为60 kgf时测定的硬度为HRA；HRB则是用直径为1.588 mm的淬火钢球和100 kgf载荷测定的洛氏硬度 HRA用于测量极硬或硬而薄的零件，如硬质合金和零件表面淬火层等；HRC用于淬火后或其它硬度较高的零件，是生产中广泛应用的一种硬度测量法；HRB用于测量退火钢、铸铁及有色金属等较软材料

① 1kgf=9.81 N

指标名称	符　号	单　位	计　算　公　式	说　　明
维氏硬度	HV	MPa	$HV=\frac{p}{F}$ $=1.8544\frac{p}{d^2}$ 式中：p——压头上的负载，kgf； F——压痕表面积，mm^2； d——压痕对角线长度，mm	测量维氏硬度是用正四棱锥形的金刚石压头，两相对锥面间夹角为136°。压痕呈四方锥形，测量压痕对角线长度即可计算出压痕表面积F，以F除负载p所得之商即为材料的维氏硬度HV 维氏硬度所用负载p可根据试样大小，厚薄和其它条件在0.5～120 kgf范围内进行选择，但最常用的负载为0.5，1．5，10，30 kgf。维氏硬度法具有一个从最软到极硬的统一硬度标准，是一种较精确的试验方法。它比洛氏硬度法能更好地测定极薄材料或极薄的表面硬化层的硬度，常用于经镀铬或氮化、碳氮共渗等化学热处理的零件
显微硬度	HM	MPa	同HV	显微硬度实质上就是小负载的维氏硬度，其原理和测量方法和维氏硬度法一样，所不同的是载荷以克(gf)计量，压痕对角线长度以微米计量。主要用以测定金属材料显微组织中各个组成相的硬度 显微硬度测试使用的负载为2，5，10，20，50，100及200 gf。钢铁材料常用负载为100和200 gf。显微硬度以HM表示，但有时也标明载荷，如$HV_{0.1}$表示所用负载为100 gf，同时也体现和维氏硬度HV的区别
肖氏硬度	HS	mm	用硬度计上刻度值表示回跳高度H	利用一定质量(2.5 g)的钢球或金刚石球，使之从一定高度(一般为254 mm)落在金属表面上，根据球回跳的高度来衡量金属硬度的大小。因此，肖氏硬度也称回跳硬度。回跳高度越高表示金属试样越硬，回跳是弹性碰撞的结果，所以肖氏硬度值只能对弹性模数相同的材料进行测定比较，否则会得出谬误的结果 肖氏硬度法主要用于生产现场测量大件成品的硬度，例如用于曲轴、凸轮轴等的验收
冲击韧性(冲击值)	α_K	J/cm²	$\alpha_K=\frac{A_K}{F}$ 式中：A_K——冲击试样所消耗的功，J； F——试样缺口处的横截面积，cm²	冲击韧性是评定金属材料抵抗冲击负载能力的机械性能指标。冲击负载不仅有力的作用，还包含作用时的速度，所以冲击负载是一种能量负载。常用的冲击试样有两种：梅氏试样(U型缺口)和夏氏试样(V型缺口)。在我国较常用的是梅氏试样。我国已规定用国际通用的夏氏试样测定船舶用材的冲击值
小能量多次冲击	—	—	绘制$A-N$曲线 A——选定的冲击能量值，J； N——试样破断前总冲击次数	表示一定的冲击能量A与破断前总冲击次数N间的关系，用绘制$A-N$曲线来表达
疲劳极限	σ_{-1} σ_{-1n}	MPa	由试验测得的$\sigma-N$(即应力一循环次数)曲线来确定	金属材料在无限次交变载荷作用下，不发生断裂的最大应力叫做疲劳极限或疲劳强度。σ_{-1}表示光滑试样的对称弯曲疲劳极限；σ_{-1n}表示缺口试样的对称弯曲疲劳极限(此外尚有拉压、接触、扭转疲劳极限等等) 国家标准规定，对于钢铁材料，采用经受$N\geq10^7$循环次数而不断裂的最大应力作为疲劳极限；对于有色金属则以经受$N\geq10^8$循环次数而不断裂的最大应力作为疲劳极限

续上表

指标名称	符号	单位	计算公式	说明
平面应变断裂韧性	K_{IC}	$N/mm^{3/2}$	$K_{IC}=Y\sigma_c\sqrt{a_C}$ 式中：σ_C——裂纹失稳扩展、即脆断时的应力，MPa； a_C——脆断时的临界裂纹长度，mm； Y——和裂纹形状，加载方式及试样几何因素有关的系数	断裂韧性是衡量金属材料在其内部存在宏观裂纹的情况下抵抗裂纹失稳扩展即抵抗脆性断裂能力的机械性能指标 对于具有一般强度和足够塑性及韧性的金属材料，当断面尺寸不是太大，破坏形式通常是韧性断裂时，仍可沿用上述传统的机械性能指标，断裂韧性主要用于高强度材料和中、低强度材料的重型零件或大型构件
门槛值（界限应力强度因子幅度）	ΔK_{th}	$N/mm^{3/2}$	$\Delta K_{th}=\Delta K_{th,0}\sqrt{1-R}$ 式中：$\Delta K_{th,0}$——交变应力σ_{min}为0时的门槛值，$N/mm^{3/2}$ $R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ 其中：σ_{min}——交变应力极小值，MPa； σ_{max}——交变应力极大值，MPa	断裂韧性指标K_{IC}适用于静负载。如果在静负载σ作用下，只要满足$a<a_C$（临界裂纹长度），裂纹就不会失稳扩展，构件是安全的，那么在同样应力值的交变载荷下，原有裂纹a就有可能缓慢扩展，直至引起疲劳破坏，根据断裂力学原理，在交变载荷作用下应以门槛值ΔK_{th}作为防止材料发生疲劳破坏的判据，即$\Delta K<\Delta K_{th}$(其中ΔK称为应力强度因子幅度，是表示裂纹前沿受力情况的力学参量，可由计算求得)。只要此式成立，疲劳破坏就不会发生。

5.3 常用金属及合金的弹性模数E

常用金属及合金的弹性模数E见表 3.1.1-13。

表 3.1.1-13 常用金属及合金的弹性模数E

金属或合金名称	E（GPa，18℃）	金属或合金名称	E（GPa，18℃）
铝 Al	72	超硬铝	75
钨 W	420	硬铝	约 70
铁 Fe	210	硅铝明	72
镉 Cd	53	超低碳钢	210
钴 Co	208	中碳钢	209
硅 Si	115	高碳钢	200～206
镁 Mg	44	特种软钢	213
锰 Mn	202	软钢	212
铜 Cu	132	铸钢	210
钼 Mo	330	可锻铸铁	175
镍 Ni	205	灰口铸铁	75～130
锡 Sn	55	球墨铸铁	154
铅 Pb	17	铬镍不锈钢	197～204
钛 Ti	105	硅钢	221～225
铬 Cr	252	黄铜	105～110
锆 Zr	70	青铜	109～112
锌 Zn	94	锡基白合金	53

5.4 常用钢铁材料的断裂韧性K_{IC}

常用钢铁材料的断裂韧性见表 3.1.1-14。

表 3.1.1-14　**常用钢铁材料的断裂韧性**

材料牌号	热处理工艺	K_{IC} (N/mm$^{3/2}$)
40 CrNiMo	830℃油淬，240℃回火	2 370
34 CrNiMo	850℃淬火，240℃回火	2 960～3 170
18 CrNiW	950℃淬火，650℃回火	4 150～4 370
34 SiMnCrMoV	930℃淬火，280℃回火	3 240
30 SiMnCrMo	930℃淬火，520℃回火	4 090～4 360
34 CrMoA	880℃淬火，650℃回火	4 600
30 CrMnSiA	900℃淬火，500℃回火	3 610～3 890
60 Si 2 Mn	870℃淬火，480℃回火	2 740～2 920
45	840℃淬火，360℃回火	2 030～2 090
35	冷轧状态	2 150～2 650
3 Cr 2 W8V	1100℃淬火，500℃回火	750～990
Cr12MoV	1050℃淬火，480℃回火	670
球墨铸铁	稀土镁处理 880℃淬火，280℃回火	1 300～1 380

5.5　常用金属材料的门槛值ΔK_{th}

常用金属材料的门槛值见表 3.1.1-15。

表 3.1.1-15　**常用金属材料的门槛值**

材料	抗拉强度 σ_b (MPa)	$R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$	门槛值 ΔK_{th} (N/mm$^{3/2}$)(裂纹长度 0.5～5.0 mm)
低碳钢	439	-1 0.13 0.35 0.49 0.64 0.75	205 213 166 138 103 124
低合金钢	847	-1 0.13 0.35 0.49 0.64 0.75	205 213 166 138 103 124
NiCr合金钢	938	-1	205
马氏体时效钢	2030	0.67	87
NiCr高强度钢	1720	-1	56.7
18-8 型不锈钢	—	-1 0.00 0.33 0.62 0.74	195 195 191 149 131
铝	78.4	-1 0.00 0.33 0.53	33 53.2 46 39

续上表

材料	抗拉强度 σ_b (MPa)	$R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$	门槛值 ΔK_{th} (N/mm$^{3/2}$) (裂纹长度 0.5~5.0 mm)
4.5%Cu—Al合金	455	−1 0.00 0.33 0.50 0.67	67.4 67.4 53.2 49.6 39
铜	220	−1 0.00 0.33 0.56 0.80	86 81.5 56.7 49.6 42.5
磷青铜	330	−1 0.33	121 131
	370	0.50 0.74	103 78
黄铜 (60/40)	330	−1 0.00 0.33 0.51 0.72	99.3 113 99.3 85 85

6 机械性能指标的简易换算

6.1 各种硬度值对照表

各种硬度值对照见表 3.1.1-16。

表 3.1.1-16 **各种硬度值对照表**

布氏 HB30D²①	洛氏				维氏	肖氏	近似强度
	HRC	HRA	15-N②	30-N	HV	HS	σb (MPa)
	70.0	86.6	—	—	1037	—	—
	69.5	86.3	—	—	1017	—	—
	69.0	86.1	—	—	997	—	—
	68.5	85.8	—	—	978	—	—
	68.0	85.5	—	—	959	—	—
	67.5	85.2	—	—	941	—	—
	67.0	85.0	—	—	923	—	—
	66.5	84.7	—	—	906	—	—
	66.0	84.4	—	—	889	90	—
	65.5	84.1	—	—	872	—	—
	65.0	83.9	92.2	81.3	856	88	—
	64.5	83.6	92.1	81.0	840	—	—
	64.0	83.3	91.9	80.6	825	86	—
	63.5	83.1	91.8	80.2	810	—	—
	63.0	82.8	91.7	79.8	795	85	—
	62.5	82.5	91.5	79.4	780	—	—
	62.0	82.2	91.4	79.0	766	84	—

续上表

布氏	洛氏			氏	维氏	肖氏	近似强度
HB30D²	HRC	HRA	15-N	30-N	HV	HS	σ_b (MPa)
	61.5	82.0	91.2	78.6	752	—	—
	61.0	81.7	91.0	78.1	739	82	—
	60.5	81.4	90.8	77.7	726	—	—
	60.0	81.2	90.6	77.3	713	81	2026
	59.5	80.9	90.4	76.9	700	—	2500
	59.0	80.6	90.2	76.5	688	80	2446
	58.5	80.3	90.0	76.1	676	—	2394
	58.0	80.1	89.8	75.6	664	78	2343
	57.5	79.8	89.6	75.2	653	—	2294
	57.0	79.5	89.4	74.8	642	77	2247
	56.5	79.3	89.1	74.4	631	—	2398
	56.0	79.0	88.9	73.9	620	75	2157
	55.5	78.7	88.6	73.5	609	—	2114
	55.0	78.5	88.4	73.1	599	73	2073
	54.5	78.2	88.1	72.6	589	—	2033
	54.0	77.9	87.9	72.2	579	71	1993
	53.5	77.7	87.6	71.8	570	—	1955
	53.0	77.4	87.4	71.3	561	70	1918
	52.5	77.1	87.1	70.9	551	—	1883
	52.0	76.9	86.6	70.4	543	69	1847
	51.5	76.6	86.6	70.0	534		1814
	51.0	76.3	86.3	69.5	525	68	1781
	50.5	76.1	86.0	69.1	517	—	1749
	50.0	75.8	85.7	68.6	509	66	1718
	49.5	75.5	85.5	68.2	501	—	1688
	49.0	75.3	85.2	67.7	493	65	1658
	48.5	75.0	84.9	67.3	485	—	1629
	48.0	74.7	84.6	66.8	478	64	1602
	47.5	74.5	84.3	66.4	470	—	1576
449	47.0	74.2	84.0	65.9	463	63	1549
442	46.5	73.9	83.7	65.5	456	—	1524
436	46.0	73.7	83.5	65.0	449	61	1498
430	45.5	73.4	83.2	64.6	443	—	1474
424	45.0	73.2	82.9	64.1	436	59	1450
418	44.5	72.9	82.6	63.6	429	—	1428
413	44.0	72.6	82.3	63.2	423	58	1405
407	43.5	72.4	82.0	62.7	417	—	1383
401	43.0	72.1	81.7	62.3	411	57	1361
396	42.5	71.8	81.4	61.8	405	—	1341
391	42.0	71.6	81.1	61.3	399	56	1320
385	41.5	71.3	80.8	60.9	393		1301
380	41.0	71.1	80.5	60.4	388	55	1281
375	40.5	70.8	80.2	60.0	382	—	1261
370	40.0	70.5	79.9	59.5	377	54	1243
365	39.5	70.3	79.6	59.0	372	—	1225
360	39.0	70.0	79.3	58.6	367	52	1207
355	38.5	69.7	79.0	58.1	362	—	1190
350	38.0	69.5	78.7	57.6	357	51	1173
345	37.5	69.2	78.4	57.2	352	—	1156
341	37.0	69.0	78.1	56.7	347	50	1140

续上表

布氏	洛氏				维氏	肖氏	近似强度
HB30D²	HRC	HRA	15-N	30-N	HV	HS	σ_b (MPa)
336	36.5	68.7	77.8	56.2	342	—	1126
332	36.0	68.4	77.5	55.8	338	49	1108
327	35.5	68.2	77.2	55.3	333	—	1093
323	35.0	67.9	77.0	54.8	329	48	1078
318	34.5	67.7	76.7	54.4	324	—	1058
314	34.0	67.4	76.4	53.9	320	47	1049
310	33.5	67.1	76.1	53.4	316	—	1035
306	33.0	66.9	75.8	53	312	46	1021
302	32.5	66.6	75.5	52.5	308	—	1007
298	32.0	66.4	75.2	52	304	44	995
294	31.5	66.1	74.9	51.6	300		981
291	31.0	65.8	74.7	51.1	296	43	969
287	30.5	65.6	74.4	50.6	292		957
283	30.0	65.3	74.1	50.2	289	42	945
280	29.5	65.1	73.8	49.7	285		932
276	29.0	64.8	73.5	49.2	281	41	921
273	28.5	64.6	73.3	48.7	278		909
269	28.0	64.3	73.0	48.3	274	40	896
266	27.5	64.0	72.7	47.8	271		888
263	27.0	63.8	72.4	47.3	268	39	877
260	26.5	63.5	72.2	46.9	264		866
257	26.0	63.3	71.9	46.4	261	38	857
254	25.5	63.0	71.6	45.9	258		847
251	25.0	62.8	71.4	45.5	255	37	837
248	24.5	62.5	71.1	45	252		827
245	24.0	62.2	70.8	44.5	249	36	818
242	23.5	62.0	70.6	44	246		809
240	23.0	61.7	70.3	43.6	243	35	800
237	22.5	61.5	70.0	43.1	240		792
234	22.0	61.2	69.8	42.6	237	34	783
232	21.5	61.0	69.5	42.2	234		775
229	21.0	60.7	69.3	41.7	231	33	766
227	20.5	60.4	69.0	41.2	229		759
225	20.0	60.2	68.8	40.7	226	32	752
222	19.5	59.9	68.5	40.3	223		744
220	19.0	59.7	68.3	39.8	221		737
218	18.5	59.4	68.0	39.3	218		729
216	18.0	59.2	67.8	38.9	216		722
214	17.5	58.9	67.6	38.4	214		716
211	17.0	58.6	67.3	37.8	211		710
209	16.5	58.4	67.1	37.4	209		703
	16.0	58.1	66.8	37			697
	15.5	57.9	66.6	36.5			691
	15.0	57.6	66.4	36			685

续上表

布　氏	洛	氏		维　氏	近似强度
HB10D²	HRB	HRA	30-T	HV	σ_b（MPa）
217	100.0	61.2	81.7	233	787
214	99.5	60.8	81.4	230	777
210	99.0	60.5	81.0	227	768
208	98.5	60.2	80.7	225	758
205	98.0	59.9	80.4	222	748
202	97.5	59.6	80.1	219	739
199	97.0	59.2	79.8	216	729
196	96.5	58.9	79.4	214	720
194	96.0	58.6	79.1	211	712
191	95.5	58.3	78.8	208	703
188	95.0	58.0	78.5	206	694
186	94.5	57.7	78.2	203	686
183	94.0	57.4	77.8	201	679
181	93.5	57.1	77.5	199	669
179	93.0	56.8	77.2	196	662
176	92.5	56.4	76.9	194	654
174	92.0	56.1	76.6	191	646
172	91.5	55.8	76.2	189	638
170	91.0	55.5	75.9	187	631
168	90.5	55.2	75.6	185	623
166	90.0	54.9	75.3	183	616
164	89.5	54.6	75.0	180	609
162	89.0	54.3	74.6	178	602
160	88.5	54.0	74.3	176	595
158	88.0	53.7	74.0	174	589
156	87.5	53.4	73.7	172	582
154	87.0	53.1	73.4	170	575
152	86.5	52.8	73.0	168	569
151	86.0	52.6	72.7	166	564
149	85.5	52.3	72.4	165	557
147	85.0	52.0	72.1	163	551
146	84.5	51.7	71.8	161	545
144	84.0	51.4	71.4	159	539
143	83.5	51.1	71.1	157	534
141	83.0	50.8	70.8	156	528
140	82.5	50.5	70.5	154	523
138	82.0	50.2	70.2	152	517
137	81.5	50.0	69.8	151	513
136	81.0	49.7	69.5	149	708
134	80.5	49.4	69.2	148	503
133	80.0	49.1	68.9	146	498
132	79.5	48.8	68.6	145	493
130	79.0	48.6	68.2	143	488
129	78.5	48.3	67.9	142	484
128	78.0	48.0	67.6	140	476
127	77.5	47.7	67.3	139	475
126	77.0	47.5	67.0	138	470
125	76.5	47.2	66.6	136	467
124	76.0	46.9	66.3	135	463

续上表

布　　氏	洛	氏		维　　氏	近似强度
HB10D²	HRB	HRA	30-T	HV	σ_b (MPa)
123	75.5	46.8	66.0	134	459
122	75.0	46.4	65.7	132	455
121	74.5	46.1	65.4	131	451
120	74.0	45.8	65.1	130	447
119	73.5	45.6	64.7	129	443
118	73.0	45.3	64.4	128	440
117	72.5	45.0	64.1	126	436
116	72.0	44.8	63.8	125	433
115	71.5	44.5	63.5	124	430
115	71.0	44.2	63.1	123	426
114	70.5	44.0	62.8	122	423
113	70.0	43.7	62.5	121	420
112	69.5	43.4	62.2	120	418
112	69.0	43.2	61.9	119	415
111	68.5	42.9	61.5	118	412
110	68.0	42.7	61.2	117	410
110	67.5	42.4	60.9	116	407
109	67.0	42.2	60.6	115	404
108	66.5	41.9	60.3	115	402
108	66.0	41.7	59.9	114	399
107	65.5	41.4	59.6	113	397
107	65.0	41.2	59.3	112	395
106	64.5	40.9	59.0	111	392
106	64.0	40.7	58.7	110	390
105	63.5	40.4	58.3	110	388
105	63.0	40.2	58.0	109	386
104	62.5	39.9	57.7	108	384
104	62.0	39.7	57.4	108	382
103	61.5	39.4	57.1	107	380
103	61.0	39.2	56.7	106	378
102	60.5	38.9	56.4	105	377
102	60.0	38.7	56.1	105	375

① 载荷p与钢球直径D的关系为：$p=30D^2$。
② 表面洛氏硬度。

6.2 硬度与抗拉强度之间的经验公式

硬度与抗拉强度之间的经验公式见表 3.1.1-17。

表 3.1.1-17　　硬度与抗拉强度之间的经验公式

材　　料	经　验　公　式①	备　　注
各种未淬硬钢	$\sigma_b=3.55$ HB $\sigma_b=3.384$ HB $\sigma_b=25.898\times10^3/(130-\text{HRB})$ $\sigma_b=24.623\times10^3/(130-\text{HRB})$ $\sigma_b=84.464\times10^3/(100-\text{HRC})$ $\sigma_b=24.525$ HS	HB<175 HB>175 HRB<90 100>HRB≥90 HRC>40

续上表

材料	经验公式①	备注
铸钢	$\sigma_b=(2.9\sim3.9)$ HB $\sigma_b=9.81\times(0.354-0.79B)$ HV	式中：$B=\frac{S\sqrt{2}}{D}$ S—压痕边长； D—压痕对角线
有色金属	$\sigma_b=9.81C\cdot$HB 铝：$C=0.27$；铜：$C=0.55$； 锡：$C=0.29$；黄铜：$C=0.35$； 硬铝：$C=0.36$； 铸铝：$C=0.362$； 铅：$C=0.29$；	未经热处理

① 表中σ_b单位为MPa。

6.3 疲劳强度和静强度之间的经验公式

表 3.1.1-18 疲劳强度与静强度之间的经验公式

材料	经验公式	已知性能	备注
碳钢，合金钢 $\sigma_b<120$	$\sigma_{-1}=(0.49\pm0.13)\sigma_b$	σ_b	奥金格公式
钢	$\sigma_{-1}=(0.285\pm0.075)(\sigma_b+\sigma_s)$	σ_b，σ_s	
钢	$\sigma_{-1}=(0.25\pm0.06)(\sigma_b+\sigma_s)+5$	σ_b，σ_s	
钢	σ_{-1P}① $=\frac{\sigma_{-1}}{1.5\pm0.5}$	σ_{-1}	
钢	τ_{-1}② $=(0.58\pm0.12)\sigma_{-1}$	σ_{-1}	
钢	$\sigma_{-1}=0.35\sigma_b+12.2$	σ_b	茹科夫公式
钢	$\sigma_{-1}=0.7\sigma_b-0.0048\sigma_b^2$	σ_b	摩列公式
高强度钢	$\sigma_{-1}=0.25\sigma_b(1+1.35\psi$③$)$	σ_b，ψ	马尔柯维奇公式
钢 铸铁 钢及轻合金 铸铁	$\sigma_{-1P}=0.85\sigma_{-1}$ $\sigma_{-1P}=0.65\sigma_{-1}$ $\tau_{-1}=0.55\sigma_{-1}$ $\tau_{-1}=0.8\sigma_{-1}$	σ_{-1} σ_{-1} σ_{-1} σ_{-1}	弗里德曼公式
铸铁 黄铜	$\sigma_{-1}=0.35\sigma_b+2$ $\sigma_{-1}=(0.3\sim0.4)\sigma_b$	σ_b σ_b	
青铜	$\sigma_{-1}=(0.3\sim0.5)\sigma_b$	σ_b	
硬铝	$\sigma_{-1}=(0.25\sim0.4)\sigma_b$	σ_b	

① σ_{-1P}——拉压对称循环疲劳强度。
② τ_{-1}——扭转对称循环疲劳强度。
③ ψ ——断面收缩率，表中公式仅适用于初步估算，误差一般在10%左右。

7 金属材料的工艺性能、化学性能和耐磨性能

7.1 工艺性能

金属材料的工艺性能是指铸造性、可锻性、可焊性、切削加工性和热处理等性能。这些工艺性能直接影响制造零件的工艺方法、生产成本和产品质量，是选用金属材料时必须考虑的因素之一。见表 3.1.1-19。

表 3.1.1-19　金属材料的工艺性能

性能名称	说　　明
铸造性	铸造性主要是指液体金属在浇注过程中的流动性、凝固过程中的收缩性和偏析倾向。 流动性是指金属充填铸型的能力。它主要与浇注温度和金属的化学成分有关。凡流动性好的金属都能浇铸出薄壁和较复杂形状的铸件，并且液体金属中的熔渣和气体易于上浮，不致形成夹渣和气孔等缺陷。 收缩性是指金属凝固和冷却过程中体积收缩的程度。液体金属自浇入铸型后，温度不断下降，逐渐由液体状态结晶成固态，然后由高温固态不断冷却到常温固态。在冷却过程中，始终伴随着收缩现象。金属的收缩性差别很大，铸钢从液态（1600℃）至常温的总收缩可达到 11.8%。凡收缩小的材料，其铸件中缩孔、疏松、变形和裂纹等缺陷均少。 偏析是指液体金属凝固后化学成分不均匀的现象。偏析愈严重，铸件各部分的性能差异越大，其质量就越差。 常用的金属材料中，灰铸铁和青铜的铸造性较好。
可　锻　性	可锻性是指金属承受（锻造、轧制、拉拔、挤压等）压力加工（狭义是指锻造）而产生塑性变形的能力。它包括金属的塑性和变形抗力两个方面。凡塑性大和变形抗力小的材料，其可锻性就好。 可锻性与金属材料的化学成分有关。所有钢材中，低碳钢的可锻性最好，在常温下就能轧压成细丝或薄板。通常含碳量越高，含合金元素越多，内部组织越复杂的钢材，它们的可锻性就越差。对于铜、铝及其合金等有色金属，化学成分和可锻性的关系也是如此，就锻造温度而言，则当金属材料内部组织处于单相区时，其可锻性最佳，而铸铁则无可锻性。
可　焊　性	可焊性是指金属材料适应常规焊接方法与工艺程序的能力。可焊性好的材料在用一般的焊接方法和工艺施焊后，不易形成裂纹、气孔、夹渣等焊区缺陷，其焊缝强度与母材相近。 常用的金属材料中，以低碳钢和低碳低合金钢的可焊性最佳。
切削加工性	金属材料的切削加工性是指金属承受切削加工的难易程度。切削加工性好坏与材料的成分和组织、强度、硬度、塑性、韧性、导热性、金属加工硬化程度以及热处理方法等有关。具有良好切削加工性能的金属材料必须具有适宜的硬度（一般在HB 170～230之间）和一定的脆性，这样可以保证切削时刀具易切入，消耗动力少，切屑易断，刀具磨损小，寿命长；同时被加工件表面粗糙度也较低。 一般来说，有色金属材料比黑色金属材料的切削加工性好，铸铁比钢的切削加工性好，中碳钢比低碳钢的切削加工性要好。易切削钢就是为了改善低碳钢（和部分中碳钢）切削加工性而生产的专门钢种，它主要用于大量制造螺钉等标准件。强度或塑性偏高的材料（如耐热钢、不锈钢、未经正火处理的低碳钢等）难于切削加工
热处理性能	衡量金属材料热处理性能的主要指标为淬硬性和淬透性；其他尚有变形、开裂倾向和回火稳定性等 淬硬性是指钢在正常的淬火条件下所能达到的最高硬度，淬硬性主要与钢中的含碳量有关，含碳量越高，淬火后的硬度值也愈高。但在实际操作中，工件截面尺寸较大，介质的冷却速度不够以及加热时晶粒过大等都会降低淬硬性 淬透性是指钢在淬火时能得到的淬硬层深度。 对于工作时在整个截面上均匀受载荷，应力状态较复杂的重要零件，如内燃机连杆、连杆螺栓等，要求在整个截面上具有均匀一致的性能，故应选用高淬透性的钢种 某些承受扭转力矩的轴类零件，如发电机转子等，其截面上的应力分布是不均匀的，表面处应力最大，心部应力为零。对于这类零件，不要求全部淬透，淬透层达零件截面的 1/2～1/4 处即可 对于承受交变弯曲应力，交变接触应力和冲击应力的齿轮（主要是高速重载齿轮）其表面要求高耐磨性和足够的疲劳强度，心部则要求一定的韧性以承受冲击。为满足这一性能要求，齿部不必完全淬透，但沿齿形轮廓（包括齿顶和齿根）应具有均匀的淬透层，层深应大于 0.5 b（b为接触线宽度）。心部硬度一般为HRC 33～48。对于这类齿轮，应选用低淬透性钢 钢的淬透性主要决定于它的化学成分。总的来说，除钴以外，所有合金元素，只要在一定含量范围内都能提高钢的淬透性

7.2　化学性能

金属材料的化学性能是指在一定温度条件下金属材料抵抗各种腐蚀性介质化学侵蚀的能力。大气、水蒸汽、有害气体、酸、碱、盐等都是程度不同的腐蚀性介质。海船船体的水线

以下部分处于海水之中，甲板机械受海面潮气的包围，热工设备中的核心部分直接与高温蒸汽相接触，对于所有这些在腐蚀性介质中工作的机械设备，在选用零件材料时首先应该考虑它们的化学性能。

金属材料的化学性能包括耐腐蚀性和抗氧化性两个方面。

金属材料抵抗周围介质腐蚀破坏作用的能力称为耐腐蚀性。按作用性质不同，腐蚀可分以下两种。

1)化学腐蚀　是金属与周围介质直接起化学反应的结果，它包括气体腐蚀和金属在非电解质中的腐蚀两种形式。其特点是腐蚀过程中不产生电流，并且腐蚀产物沉积于金属表面上。如铁器表面在潮气或水中生成黄色铁锈（$Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$）的现象就是化学腐蚀的典型例子。

2)电化学腐蚀　金属与酸、碱、盐等电解液相接触而发生反应时的腐蚀。它的特点是腐蚀过程中有电流产生（即微电池作用），其腐蚀产物不覆盖在作为微电池阳极的金属表面上。引起电化学腐蚀的原因一般认为与金属的电极电位有关。

电化学腐蚀的过程比化学腐蚀要复杂得多，其危害性也比较大。金属材料所受的腐蚀破坏大多属于这一类型。

按照腐蚀破坏特征的不同，可将常见的腐蚀形式分为以下几种。

(1)一般腐蚀　又称均匀腐蚀或连续腐蚀。这种腐蚀是均匀地发生在整个金属表面上的，因而均匀地侵蚀金属材料，减小其截面尺寸。这种腐蚀危害性较小，对金属的机械性能影响也较小。

(2)晶间腐蚀　这种腐蚀是在金属内部沿晶粒边缘进行的。它是金属材料中危险性最大的一种腐蚀；因为这种腐蚀通常不引起金属外形的任何变化，而是使其内部结构和机械性能急剧恶化，以致常使设备或机件突然损坏。

(3)点腐蚀　其特征是集中在金属表面不大的区域内，形成点蚀坑，并迅速地向深处发展，最后穿透金属。所以，这也是一种危害性较大的腐蚀破坏。

(4)应力腐蚀和腐蚀疲劳　所谓应力腐蚀是指在静应力(包括加载前金属内部的内应力)作用下，金属在腐蚀介质中所产生的破坏。腐蚀疲劳则是在交变应力作用下，金属在腐蚀介质中产生的破坏。它们与晶间腐蚀的不同点是，这些腐蚀一般是穿过晶粒的，即所谓穿晶腐蚀；但有时也以晶间腐蚀或晶间腐蚀与穿晶腐蚀相结合的形式出现。及时对零件构件进行消除内应力的热处理就可以消除或减轻这两种形式的腐蚀。

耐腐蚀性是金属材料的重要性能之一。提高金属耐腐蚀性的一般途径是：(1)使金属具有均匀的化学成分和内部组织，使不同金属避免直接接触等等，总之应尽可能阻碍微电池的形成；(2)提高金属的电极电位，例如，对钢铁零件进行抗蚀氮化处理以及镀镍、镀铬等；(3)使金属表面形成致密的保护膜(即所谓金属钝化)，阻止腐蚀介质侵入金属内部。但是，最根本的措施还是针对不同的腐蚀介质采用有效的耐腐蚀金属，如不锈钢，耐酸钢、耐蚀铸铁以及铜、铝合金等。

金属材料的抗氧化性是专门指在室温或高温条件下金属抵抗氧化作用的能力。

氧化是自然界普遍存在的一种化学现象。金属材料中，除了金、铂、银等少数金属外，都能与空气中的氧化合而在表面形成一层氧化物。特别是各种动力设备(工业锅炉、内燃机、汽轮机等）中处于高温条件下工作的零件，例如排气阀，如果其材料不具备良好的抗氧化性能，就会受到氧化烧损而起皮，而很快失效。抗氧化性是高温材料的一项重要性能指标。

抗氧化性良好的耐热不起皮钢，在高温条件下同样会迅速氧化，但其特点是能在表面上

形成一层非常牢固而致密的氧化膜，使材料与后来的氧隔绝而受到保护。

提高金属材料抗氧化能力的主要途径是合金化。在碳钢的基础上加入适量的合金元素，如Cr、Al、Si等，就可使材料在高温下接触氧时形成致密的Cr_2O_3、Al_2O_3或SiO_2等薄膜，从而提高其抗氧化性。

7.3 耐磨性能

材料的耐磨性是指在一定的工况条件下，摩擦副材料在摩擦过程中抵抗磨损的能力。材料的耐磨性首先与组成摩擦副的偶配材料密切相关。同一材料与不同的材料相匹配，其耐磨性相差悬殊。此外，耐磨性还受到摩擦条件(负载、速度、温度、表面状况等)、环境介质(水、油、气氛等)、摩擦副的结构形式（偶配零件的几何形状，相对尺寸、加工及装配精度等）以及使用与维护条件等因素的不同影响。因此，与机械性能不同，耐磨性并非材料的固有特性，它因使用或测试条件而异；所有耐磨性数据只适用于给定条件，不可随意引用。

对材料耐磨性提出的要求与摩擦副的工作性质有关。例如，与泥沙、矿石等直接接触的零件，如抓斗、泥浆泵、叶片等，必须经受磨粒磨损，故为了保证使用寿命，耐磨性高是对材料的唯一要求(在保证其机械性能的前提下)；对用于机械传动的摩擦副，如各类轴颈与轴承、齿轮、十字头滑块与导板等，为了提高机械效率、保持工作精度，必须减少摩擦引起的能量消耗和材料磨损，此时摩擦副材料既要具有高的耐磨性，还要有良好的减摩性——低的摩擦系数；最后，对用作离合器、制动器及摩擦传动装置的摩擦副，则其材料除要求耐磨性以外还必须具有大而稳定的摩擦系数。因此，广义而言，材料的耐磨性实指材料的摩擦磨损性能，其确切含义随磨擦副的工作性质而定。在选用材料时必须注意这一特点。

材料耐磨性的评定方法与指标迄今尚未统一。现在用得最广泛的指标是磨损率，即材料单位时间或单位距离的磨损量。例如，船用大型低速柴油机气缸套的磨损率约为0.1 mm/1000 h；高速柴油机曲轴主轴颈的磨损率约为0.02 mm/1000 h。

材料的减摩性通常由摩擦副的摩擦系数体现；由两种材料偶配而成的摩擦副的摩擦系数越小，说明其减摩性越好。但是，摩擦系数也非材料的固有特性，而是材料和摩擦条件的综合特性。所以，必要时摩擦系数应按给定条件测取。减摩材料的适用条件见表3.1.1-20。

用作摩擦片等的摩阻材料既要有耐磨性又要有增摩性，即其摩擦系数要大。为增大摩擦系数和满足其他性能要求，摩阻材料常由粉末冶金制成。粉末冶金摩阻材料主要分为铁基和铜基两类。铁基摩阻材料的摩擦系数大($f=0.4\sim0.55$，即比一般钢铁偶配件的摩擦系数大2～3倍)，耐热性高，强度好，但偶配件表面易粘着，摩擦系数的稳定性差，耐磨性不如铜基，适用于重载和干摩擦的工作条件。铜基摩阻材料的摩擦系数较小，尤其是在油介质中工作的摩擦副，摩擦系数仅为0.08～0.12；但铜基摩阻材料的导热性好，摩擦系数变化小，接合平稳，耐磨性较高，主要用于轻载的干摩擦或油润滑的工作条件。表3.1.1-21为常用的国产粉末冶金摩阻材料。

表 3.1.1-20　　常用减摩材料的适用条件

<table>
<tr><th rowspan="3">材　料</th><th colspan="4">工　作　条　件</th><th colspan="4">推荐的工艺及结构参数</th></tr>
<tr><th rowspan="2">压力
(MPa)</th><th rowspan="2">速度
(m/s)</th><th colspan="2">温度　(℃)</th><th rowspan="2">合金层
厚度
(mm)</th><th rowspan="2">轴　承　精　度
(mm)</th><th rowspan="2">轴颈硬度
(HB)</th><th rowspan="2">合金与衬套固定方式</th></tr>
<tr><th>油　温</th><th>最高使用温度</th></tr>
<tr><td rowspan="5">巴氏合金
(锡基、铅基
白合金)</td><td>1.0~5.0</td><td>2~5</td><td>≤50</td><td rowspan="5">≤150</td><td></td><td>长度公差带的1/10</td><td rowspan="5"><160</td><td>机械方法</td></tr>
<tr><td>1.0~5.0</td><td>2~5</td><td>≤60</td><td>≥3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5.0~10.0</td><td>5~10</td><td>≤75</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5.0~12.0</td><td>≤10</td><td>≤80</td><td>≤1</td><td>长度公差带的1/100</td><td>冶金方法</td></tr>
<tr><td>5.0~15.0</td><td>≤15</td><td>≤100</td><td>0.1~0.3</td><td>长度公差带的1/1000</td><td></td></tr>
<tr><td>钢背铜
铅合金</td><td>15.0~25.0</td><td>≤15
≤20</td><td>≤100
≤120</td><td>180</td><td><0.5</td><td>长度公差带的1/1000</td><td>≥200</td><td>冶金法或轧制</td></tr>
<tr><td>钢背低锡
铝基合金
(Sn约
6%)</td><td>15.0~25.0</td><td>≤15</td><td>≤100</td><td>180</td><td><1
<0.5</td><td>长度公差带的1/1000</td><td>250~
300</td><td>冶金法或轧制</td></tr>
<tr><td>钢背高锡铝
基合金
(Sn>
20%)</td><td>20.0~30.0</td><td>≤20</td><td>120</td><td>180</td><td><0.5</td><td>长度公差带的1/1000</td><td>300~
400</td><td>冶金法或轧制</td></tr>
</table>

表 3.1.1-21　　适用于干摩擦工作条件的粉末冶金摩阻材料

<table>
<tr><th rowspan="2">种　类</th><th rowspan="2">牌　号</th><th colspan="10">化　学　成　分　(%)</th></tr>
<tr><th>Fe</th><th>Cu</th><th>C(石墨)</th><th>SiO_2</th><th>Sn</th><th>Pb</th><th>MoS_2</th><th>石棉</th><th>SiC</th><th>其它</th></tr>
<tr><td rowspan="5">铁　基</td><td>FM-68-50</td><td>68</td><td>—</td><td>11</td><td>—</td><td>3</td><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td>7</td><td></td></tr>
<tr><td>FM-69-54</td><td>69</td><td>5</td><td>11</td><td>1</td><td>—</td><td>10</td><td>4</td><td>—</td><td>—</td><td></td></tr>
<tr><td>FM-69-20</td><td>69</td><td>—</td><td>23</td><td>1</td><td>—</td><td>—</td><td>5</td><td>—</td><td>—</td><td></td></tr>
<tr><td>7501</td><td>64</td><td>5</td><td>7</td><td>8</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>3</td><td>—</td><td></td></tr>
<tr><td>754</td><td>65~74</td><td>—</td><td>13-17</td><td>—</td><td>3~5</td><td>2~4</td><td>3~5</td><td>—</td><td>3~5</td><td>铸石粉
3~4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">铜　基</td><td>CM-68-30</td><td>8</td><td>68</td><td>10</td><td>4</td><td>5</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>$BaSO_4$
5</td></tr>
<tr><td>CM-64-20</td><td>7.9</td><td>64.3</td><td>7.9</td><td>4.8</td><td>7.2</td><td>7.2</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr>
</table>

离合器、制动器和摩擦传动装置中摩擦副的工作性能和可靠性，不仅取决于摩阻材料，而且还与摩擦偶配件的材质选配有关。与粉末冶金摩阻材料偶配的材料常采用铸铁和钢，在特殊场合可选用青铜。

8　选择金属材料的基本原则和方法

轮机工程技术人员在遇到零件失效而无备件的情况时，必须重新选配零件。此时确定零件的材料及其机械性能是最重要的步骤。零件的重新选配首先应严格遵守产品说明书中原设计的技术规定以及船舶检验局和船级社(ZC)的有关规范、条例和规则，例如《钢质海船入级与建造规范》、《船用产品检验规则》等；在技术资料缺乏的情况下，才允许按一般的原则和方法重新选配零件。

选择零件材料的一般原则是：

1)保证机械性能。从零件的工作条件中找出对材料的机械性能要求。为了准确地了解零件的使用特性，必须研究零件的失效形式，从而找出对零件失效起主导作用的机械性能指标。

此外，还要考虑耐腐蚀性等其它性能要求。

2)满足工艺性能。在保证零件机械性能的基础上，确定零件的毛坯是否采用轧制件、锻件、铸件或焊接件，此时应考虑冷热加工的工艺性。

3)符合经济原则。

选配零件材料的一般方法与步骤如表 3.1.1-22 所示。

表 3.1.1-22　　选配零件材料的一般方法与步骤

方法与步骤	说明
外部观察	1）对损坏的机件进行仔细的肉眼或低倍观察，测量并记录损坏的位置、尺寸变化、断口宏观特征、表面剥落产物和腐蚀产物，必要时应进行照相 2）了解机件的工作环境条件和失效经过。观察相邻零件的损坏情况，以判断零件的损坏次序，初步判断失效类型 3）进一步收集有关该机件的设计、材料加工制造、装配及使用维护等一系列历史资料，并收集与该机件失效相类似的有关资料
试验检查	试验检查一般有下列几个项目，可根据需要和可能选择，并非每项都必须进行 1)检查受力情况　用实验应力分析等方法检查确定失效机件损坏部位是否为主应力最大的部位，产生裂纹的平面与最大主应力方向之间的关系，用以判明机件几何形状设计和结构受力位置安排是否合理。 2）断口微观分析　当宏观断口分析难以准确下结论时，还要进一步研究失效的微观机制，可借助电子扫描显微镜确定裂纹源、发展区和最后断裂区的断裂性质 3）检查化学成分　查明失效机件所使用的材料，有时要用剥层法查明化学热处理零件截面的成分梯度；必要时还可用电子探针等方法了解局部区域化学成分变化情况。化学成分是选配零件材料的主要依据，原则上应保持原样。只有当零件频繁失效并确定是机械性能不足时，才可改用性能较好的材料 4)检查宏观健全度　制造过程对零件造成的缺陷，如反映冶金质量的偏析、疏松、缩孔、气泡、夹杂物；锻造的流线分布、锻造裂纹；热处理的氧化脱碳、淬火裂纹；磨削裂纹等都会降低零件的使用性能。所以对机件失效部位的表面、纵横断面要进行低倍检查，即检查宏观健全度。有时还要用各种无损探伤方法检查内部缺陷及其分布。对于表面强化零件要检查强化层厚度、浓度、硬度梯度的分布。还要检查零件在使用过程中产生的塑性变形和裂纹发生扩展的特征，用以判明使用过程中受力的大小和性质。 在取样时应注意部位的代表性，要沿纵横两个方向取样，有时要取对比试样将失效部位和未失效部位进行健全度对比。 5）检查金相组织　材料的性能由其成分和组织所决定，对各种重要零件材料都已制订了相应的金相组织要求和检查标准。金相检查可判明组织的类型、形状、大小、数量及分布均匀性，鉴别各种组织缺陷，判断失效零件材料的内部组织状态是否符合标准。在金相检查时，特别是要观察失效策源地裂纹周围组织状态的变化。 6）测定机械性能　用硬度值初步判定材料的机械性能。对于大截面零件，除测硬度外，还要在失效部位取样测定拉伸强度和冲击韧性等机械性能 7）进行断裂力学分析　对于压力容器、大截面零件、应力腐蚀、氢脆等低应力脆断零件，要测定失效材料的断裂韧性。通过无损探伤找出失效部位最大裂纹尺寸，并根据最大工作应力进行断裂力学验算，以确定材料的断裂韧性是否合格。如承受交变载荷，则应进行疲劳剩余寿命的核算 8）测定工艺性能　有时要对失效机件进行冷热加工工艺性能等补充试验。例如测定淬透性、晶粒长大倾向，氧化脱碳倾向、变形开裂倾向、渗碳速度及磨裂倾向等。 9）测定内应力及其分布　内应力的大小和分布情况对机件使用寿命影响很大，所以要测定失效机件中的残余内应力的性质，大小和分布以便进行综合力学分析
综合分析	在掌握必要的资料和数据的基础上开展综合分析，确定损坏机理，判明失效原因
选择材料	针对失效原因，提出综合治理的措施，并结合零件的使用性能要求，选择材料和相应的热处理工艺
试验验证	根据零件的使用性能要求和所提防止失效的措施，进行有关的机械性能和其他试验（如腐蚀试验等）；对于重要零件，应进行台架试验。试验合格，并通过有关的船检手续，方可装机使用

第 2 章　钢铁材料的热处理及表面强化

1　铁碳合金状态图

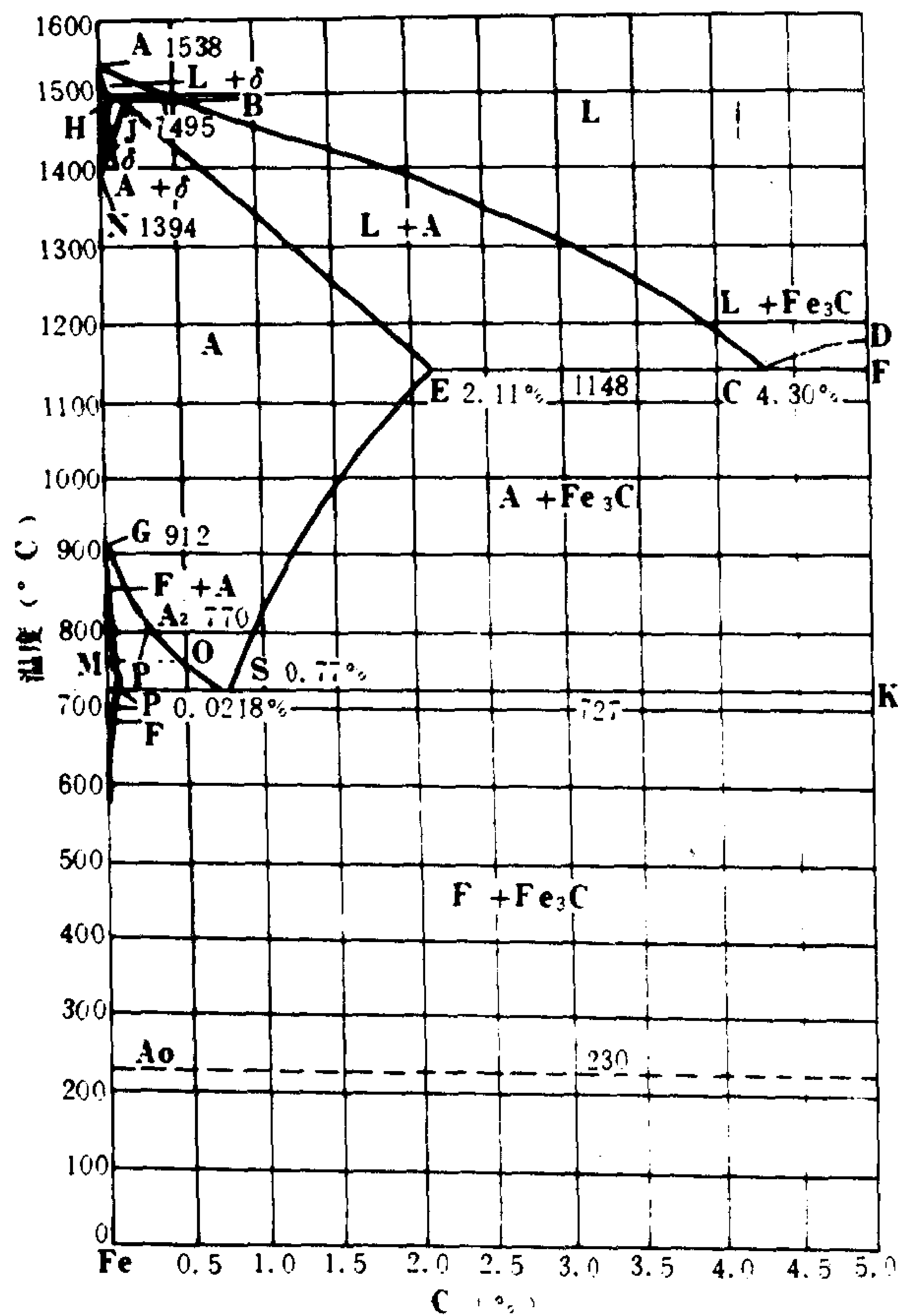


图 3.1.2-1　Fe-Fe_3C 状态图

图 3.1.2-1 为 Fe-C 合金中的 Fe-Fe_3C 系平衡图，又称状态图。Fe-Fe_3C 系平衡图又称亚稳定系平衡图。图中的各特性点和线以及出现的相和各相的性能见表 3.1.2-1～表 3.1.2-5。

表 3.1.2-1　　Fe-Fe_3C 状态图中的特性点

特性点	温度（℃）	含碳量（%）	说　　明
A	1538	0	纯铁熔点
B	1495	0.53	在包晶转变温度下的液相含碳量

续上表

特性点	温度(℃)	含碳量(%)	说明
C	1148	4.3	共晶点 $L_c \rightleftarrows \gamma_E + Fe_3C$
D	1227	6.69	渗碳体熔点、
E	1148	2.11	碳在γ-Fe中的最大溶解度
F	1148	6.69	共晶转变线与渗碳体成份线的交点
G	912	0	$\alpha-Fe \rightleftarrows \gamma-Fe$同素异构转变点($A_3$)
H	1495	0.09	碳在δ-Fe中的最大溶解度
J	1495	0.17	包晶点
K	727	6.69	共折转变线与渗碳体成份线的交点
M	770	0	$\alpha-Fe$ 磁性转变点(A_2)
N	1394	0	$\gamma-Fe \rightleftarrows \delta-Fe$同素导构转变点($A_4$)
O	770	~0.5	铁素体的磁性转变点(A_2)
P	727	0.0218	碳在α-Fe中的最大溶解度
S	727	0.77	共折点
Q	0	0.008	碳在α-Fe中的溶解度，约 600℃

表 3.1.2-2 **$Fe-Fe_3C$状态图中的特性线**

特性线	说明
AB	δ相的液相线
BC	γ相的液相线
CD	Fe_3C相的液相线
AH	δ相的固相线
JE	γ相的固相线
HN	由δ相析出γ相的始温线，也是碳在δ相中溶解度线
JN	由δ相析出γ相的始温线
GS	表示亚共析铁碳合金的上临界温度A_3线
GP	表示温度高于A_1时碳在α相中的溶解度线
ES	表示过共析合金的上临界温度A_{cm}线，也表示碳在γ相中的溶解度线
PQ	表示温度低于A_1时碳在α相中的溶解度线
M	α相磁性转变A_2线

表 3.1.2-3 **$Fe-Fe_3C$状态图中的三条水平线**

水平线	说明
HJB	1495℃ $\gamma_J \rightleftarrows L_B + \delta_H$ 包晶转变平衡线,
ECF	1148℃ $L_c \rightleftarrows \gamma_E + Fe_3C$ 共晶转变平衡线，其产物称为莱氏体L_d，它只在 2.11%~6.69%C 之间的铁碳合金中发生,
PSK	727℃ $\gamma_S \rightleftarrows \alpha_P + Fe_3C$ 共析转变平衡线，其产物称为珠光体P，在含碳 0.0218%~6.69%铁碳合金中都发生共析转变。

表 3.1.2-4 **铁碳含金中基本相及其常温性能**

基本相	符号	说明	抗拉强度 σ_b(MPa)	硬度HB	伸长率δ(%)	冲击韧性 α_k(J/cm²)
液相	L	碳在铁中的溶液	—	—	—	—
铁素体	α或F	碳在α-Fe 中的固溶体	250	80~100	50	300
奥氏体	γ或A	碳在γ-Fe 中的固溶体	400	160~200	40~50	—
渗碳体	Fe_3C	铁与碳的化合物	35	HV>820	近于0	—

表 3.1.2-5　　　　　　　　　　**铁碳合金基本组织及其常温性能**

组织名称	符　号	结　合　形　式	抗拉强度 σ_b(MPa)	硬度HB	伸长率δ(%)	冲击韧性 α_k(J/cm²)
铁素体	α或F	碳在α-Fe中的间隙型固液体	25	80-100	50	300
渗碳体	Fe_3C	铁和碳复杂正交晶格化合物	35	>820	0	--
珠光体	P	铁素体与渗碳体的机械混合物	75	180	20～75	30～40

Fe-Fe_3C状态图上的各临界温度都是在热力学上达到平衡状态下的相变温度，而实际加热和冷却时都会发生过热和过冷现象。由于加热或冷却速度的影响，转变温度偏离平衡的A_1和A_3点，为此采用A_{c_1}、A_{c_3}和A_{r_1}、A_{r_3}等符号分别表示实际加热和冷却时的临界温度。各临界温度的符号和说明见表 3.1.2-6。

表 3.1.2-6　　　　　　　　　　**Fe-Fe_3C状态图上的临界点及其意义**

符　号	说　　　明
A_0	渗碳体的磁性转变点
A_1	在平衡状态下，奥氏体、铁素体、渗碳体共存温度
A_3	亚共析钢在平衡状态下，奥氏体和铁素体共存的最高温度
Ac_{cm}	过共析钢在平衡状态下，奥氏体和渗碳体共存的最高温度
Ac_1	钢在加热时，开始形成奥氏体的温度
Ac_3	亚共析钢加热时所有铁素体均转变为奥氏体的温度
Ac_{cm}	过共析钢加热时，所有渗碳体完全溶入奥氏体的温度
Ar_1	钢在奥氏体化后冷却时，奥氏体分解为铁素体和渗碳体的温度
Ar_3	亚共析钢高温奥氏体化后，冷却时铁素体开始析出的温度
Ar_{cm}	过共析钢高温奥氏体化后，冷却时渗碳体开始析出的温度
A_4	δ相与奥氏体共存的温度
Ac_4	亚共析钢高温加热时奥氏体开始转变成δ相的温度
Ar_4	钢在高温形成δ相，冷却时完全转变为奥氏体的温度

2　热处理基本原理

2.1　钢在加热时的转变

1)奥氏体的形成过程

将共析钢缓慢地加热至临界温度以上时，在铁素体与渗碳体的相界面上形成奥氏体晶核并不断长大；剩余的渗碳体继续溶入奥氏体中；奥氏体成分均匀化。

亚共析或过共析钢的奥氏体形成过程与上述相同，但在缓慢加热的情况下，当温度高于A_1时先产生珠光体转变为奥氏体。当温度继续升高时亚共析钢在A_1～A_3间还有先共析铁素体继续向奥氏体转变，过共析钢在A_1～A_{cm}之间还有二次渗碳体继续溶入奥氏体的转变。

2)影响奥氏体形成的因素

提高加热温度，同时增大加热速度，可缩短奥氏体形成的时间。钢中存在有一定量的合金元素(铬、钼、钨等)并与碳生成某些强碳化物时，将延缓奥氏体的形成。

3)奥氏体的晶粒长大

(1)起始晶粒度　钢加热至临界温度以上，奥氏体转变刚刚结束时的晶粒大小。

(2)实际晶粒度　钢在某种工艺条件下最终所得到的晶粒大小，实际晶粒度基本上决定钢在室温时的晶粒大小。

(3)本质晶粒度　表示奥氏体晶粒长大的倾向。因冶炼方法不同，钢在同样的加热条件

下可表现出不同的晶粒长大倾向。凡在加热时晶粒长大倾向小的钢称为本质细晶粒钢；反之，称为本质粗晶粒钢。

奥氏体晶粒通过晶界移动，小晶粒群的合并而长大。奥氏体的晶粒大小对其在冷却后形成产物的结构和性能有重要影响。

2.2 钢在冷却时的转变

1）过冷奥氏体的等温转变

过冷奥氏体等温转变图简称 *TTT* 图或奥氏体等温转变曲线，也称为 S或C 曲线，是表示奥氏体化的钢在临界温度A_1以下不同温度保温时，奥氏体转变量和等温时间的关系，它对于制定钢的热处理工艺规范有指导意义。

图 3.1.2-2 为共析钢奥氏体的等温转变图。该图是将若干个共析钢试样加热形成奥氏体后，迅速过冷到临界点以下不同的温度，在每一温度作不同时间的停留，使奥氏体发生转变，并记录其转变开始和终了的时间。记入温度—时间的坐标（对数值）上，将各温度下的开始转变点和转变终了点分别连接成两条曲线，该曲线简称 S 曲线。当钢中成分，奥氏体形成的温度、速度、晶粒大小，形变和应力状态不同时，奥氏体等温转变图的形状和各点线位置都有很大差别。但各种钢的奥氏体等温转变规律大致相同，均有 3 个等温转变区，即高温 A_1～550℃为珠光体转变区，中温 550℃～M_s为贝氏体转变区，低温M_s～M_f为马氏体转变区。在贝氏体转变区中，550～400℃形成上贝氏体，400℃～M_s 形成下贝氏体；过冷奥氏体在发生珠光体和贝氏体转变前都有孕育期，即过冷奥氏体亚稳定区；马氏体转变都在一个温度区间，即由M_s马氏体转变开始温度至M_f（马氏体转变终止温度）降温过程中进行转变。含碳量大于 0.4%的钢，马氏体转变不能彻底，常有数量不等的残余奥氏体存在钢中。

图 3.1.2-2 共析碳钢等温转变图

共析钢在各等温转变时所得到的组织及其特征见表 3.1.2-7。

表 3.1.2-7 共析钢等温转变组织及其特征

组织转变类型	转变温度范围	过冷度	转变产物	代表符号	层片间距（μm）	清晰的放大倍数	转变产物硬度HRC
珠光体型	>650	小	珠光体	P	≥1.3	<400	20～25
	650～600	中	索氏体	S	0.1～0.3	1000	25～30
	600～500	大	屈氏体	T	≤0.15	10^4～10^5	35～37

续上表

组织转变类型	转变温度范围	过冷度	转变产物	代表符号	层片间距(μm)	清晰的放大倍数	转变产物硬度HRC
贝氏体型	500～350	更	上贝氏体	B_c	—	>400	40～45
	350～230	大	下贝氏体	B_d	—	>400	45～55
马氏体型	230～−80	极大	马氏体	M	—		60～65

2)影响奥氏体等温转变的因素

影响奥氏体等温转变的主要因素分述如下:

(1)碳的影响　钢中含碳量为共析成分时，转变曲线在坐标上位于孕育期最大处，亚共析钢随含碳量的减少，过共析钢随含碳量的增加，转变曲线均向左移，即孕育期均小于共析钢。M_s 和M_f 点随含碳量的增加而降低。

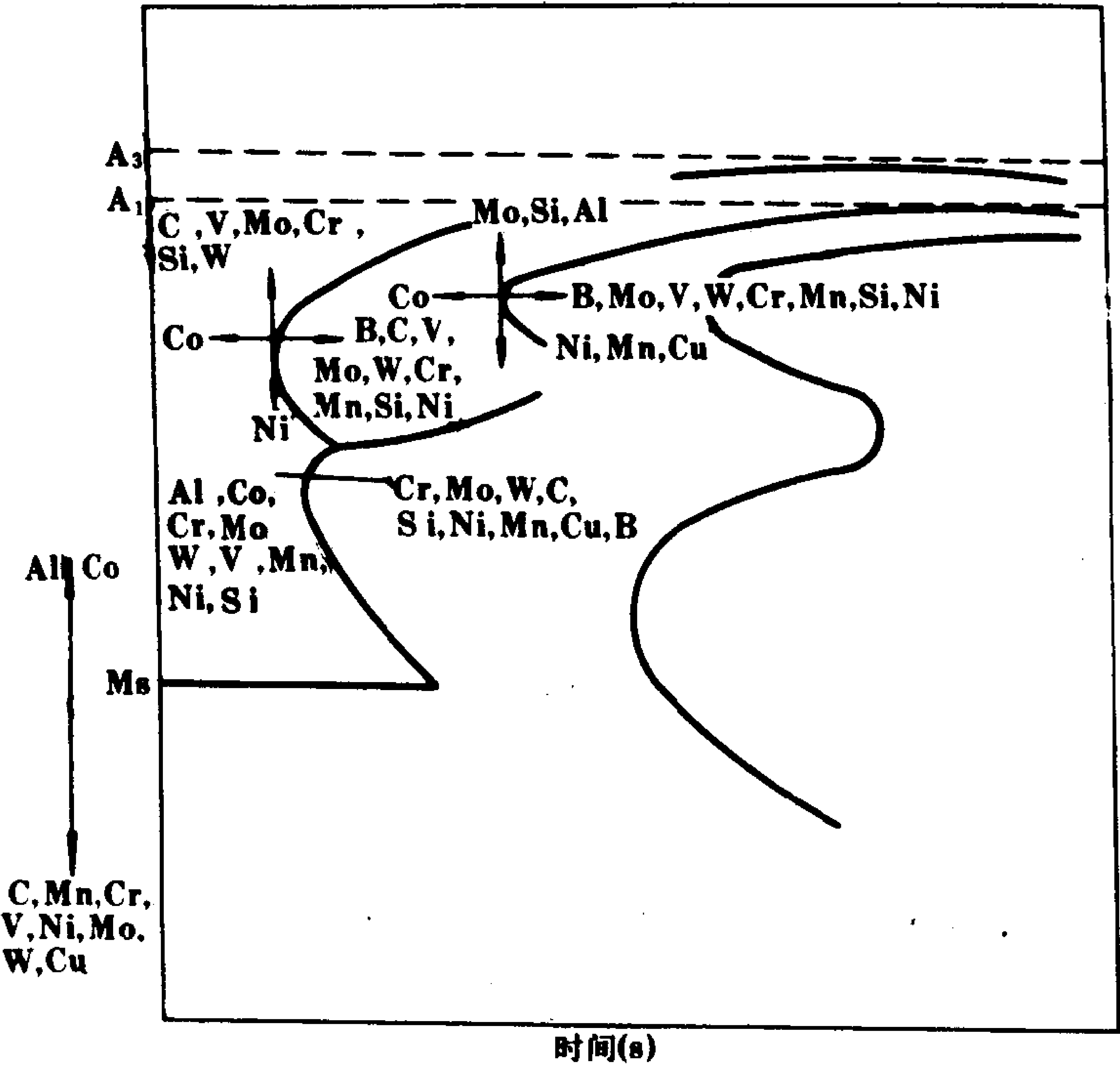


图 3.1.2-3　合金元素对S曲线的影响

(2)合金元素的影响　常见合金元素对奥氏体等温转变的影响见图 3.1.2-3。在钢中加入两种或多种搭配适宜的合金元素时可显著增大孕育期，而推迟奥氏体的扩散型转变，并改变其相变的温度。某些元素如铬、钨、钒等使曲线出现两个孕育期。

(3)奥氏体状态的影响　均匀化的奥氏体稳定性增加，使曲线右移，奥氏体晶粒粗化产生晶核的条件减少，也增加稳定性。

(4)过剩相的影响　细微的氧化物、氮化物及碳化物等过剩相的存在，能诱发奥氏体转变晶核的产生。

2.3　奥氏体在连续冷却时的转变

过冷奥氏体的连续冷却转变图又称CCT图，它反映了钢自奥氏体状态以不同冷却速度连续冷却时，组织转变开始及终止的温度与时间关系。图 3.1.2-4 为共析钢连续冷却转变图，图中实线为连续冷却转变曲线及冷却曲线，虚线为等温转变曲线；与转变开始曲线相切的冷

却曲线代表临界冷却速度。当连续冷却速度大于临界冷却速度时，可抑止扩散型的转变，仅产生马氏体转变，而且 M_s 点较等温转变图中的 M_s 点低。当小于临界冷却速度时，共析钢仅发生珠光体转变或马氏体＋珠光体转变，不发生贝氏体转变。此外钢中成分、奥氏体状态不同时，连续冷却曲线的形状和位置亦有很大差别。

奥氏体等温转变曲线图与奥氏体连续冷却转变图是选用钢种和制定热处理工艺的重要依据之一。同时根据各钢种的转变曲线图可以衡量其热处理工艺结果是否合理、正确以及判断其工艺执行的质量。等温转变图中开始转变曲线前面的区间是过冷奥氏体介稳定状态存在的温度和时间范围，据此可以选择合理的淬火冷却速度，适宜的淬火介质，确定等温停留的温度和时间，选定形变热处理的形变温度范围等，根据奥氏体连续冷却曲线可以估计退火时所需的冷却速度，明确临界冷却速度，保证淬火质量，决定是否需要冷处理等。

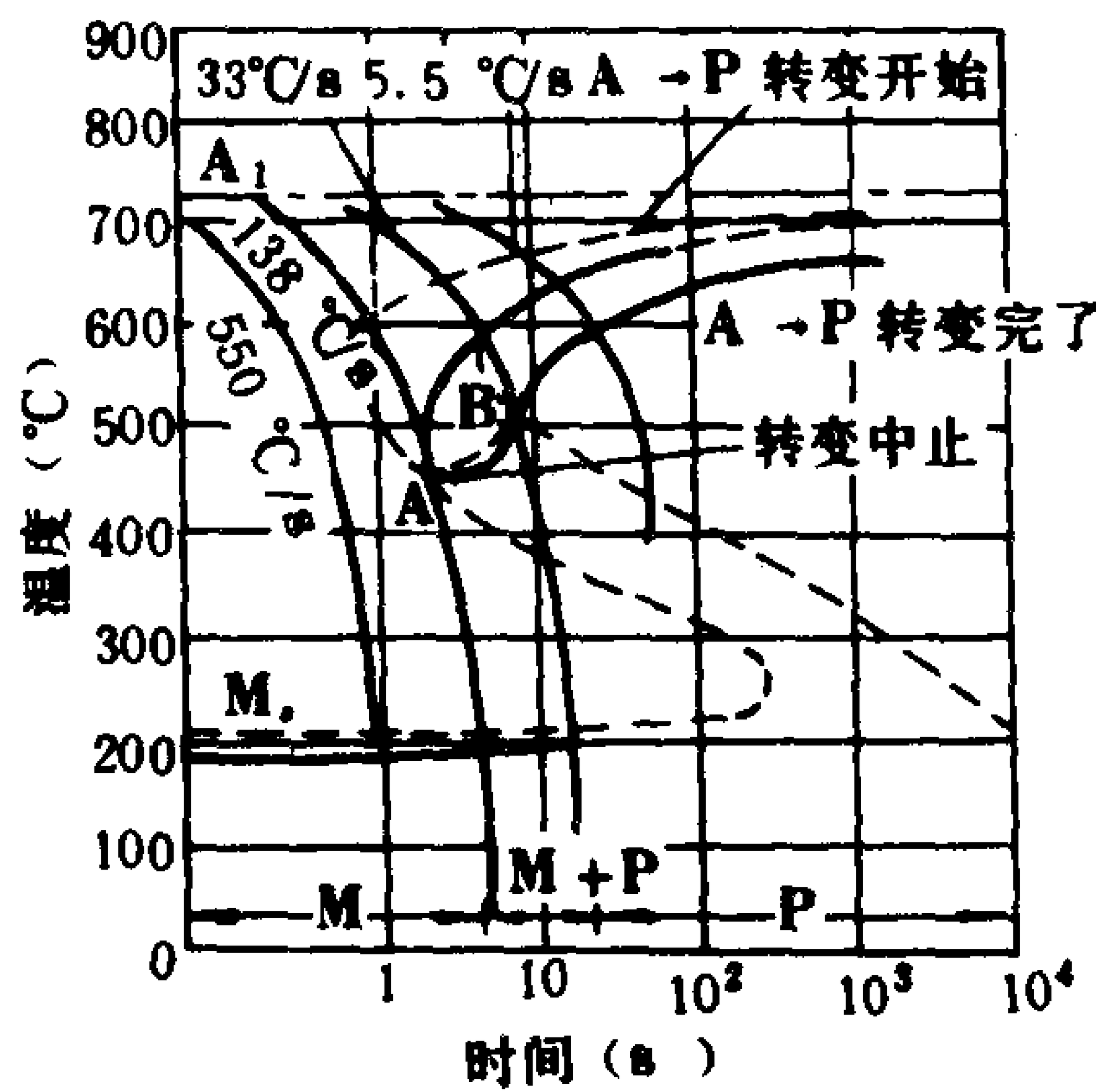


图 3.1.2-4　共析碳钢连续冷却转变图

（图中虚线为等温转变图）

2.4　马氏体回火转变

当钢由奥氏体状态过冷至 M_s 点以下时，奥氏体的转变成为非扩散型的 A 向 M 转变。马氏体硬度大而脆性高，其一次冲击值几乎等于零。必须进行回火处理以调整淬火钢的组织和性能。随回火温度的升高，马氏体的变化见表 3.1.2-8 所示。

表 3.1.2-8　　马氏体回火时的转变

回火种类	回火温度（℃）	转变产物	符　号	组　织　状　态	目　　的
低温回火	150～200	回火马氏体	M′	极细小的弥散型碳化物＋M′＋A′	降低淬火应力和脆性，硬度不减小或略增加
中温回火	350～500	回火屈氏体	T′	铁素体与细粒状渗碳体的机械混合物	获得高弹性和高屈服极限
高温回火	500～650	回火索氏体	S′	铁素体与粒状渗碳体的机械混合物	获得良好的强度与韧性的配合——综合机械性能好

3　常规热处理方法，目的及其在船机零件中的应用

在制造船舶动力装置各种机器及设备的零件时，为改善和提高材料的性能，充分发挥材料的潜力或为了便于加工，热处理工艺是必不可少的，至于船机中的关键零部件则必须进行热处理以保证机器设备的可靠性，延长使用寿命和减轻机械设备的自重。

3.1　退火

将钢制零件加热至临界温度以上，保温后缓慢冷却（在炉中或在热灰中）的一种工艺过程，称为退火。退火一般是零件机加工前的最初热处理工序，在某些情况下也可作为最后的热处理工序，如不进行机加工的铸造锚及锚链等即是。

1）退火的目的

（1）降低原材料的硬度，改善切削加工性。

（2）消除组织中的缺陷，如偏析，粗大晶粒及魏氏组织。

（3）消除零件的内应力，稳定尺寸，以防止产生变形和开裂。

（4）作为预先热处理，为后续的热处理准备组织条件。

各种退火的温度范围及过程如图 3.1.2-5 所示。

2)退火工艺的分类、工艺过程及应用

常用退火的种类及应用见表 3.1.2-9。

表 3.1.2-9　　**常用退火的种类及应用**

退火种类	主要目的	工艺过程	应用范围
扩散退火	化学成分均匀化	加热至Ac_3+150～200℃保温后缓冷	铸钢件和有偏析的锻轧件
完全退火	细化组织降低硬度	加热至Ac_3+30～50℃保温后缓冷	亚共析钢，锻、轧、焊接件
等温退火	细化组织降低硬度代替完全退火	加热至Ac_3+30～50℃保温后随炉冷却至稍低于A_{r1}温度等温停留后缓冷	碳钢合金钢制的锻件，可缩短完全退火的周期
球化退火	使钢中碳化物球化降低硬度提高塑性切削性，匀化组织	加热至Ac_1+20～40℃或Ac_1以下20～40℃保温后缓冷	高碳钢、工具钢、轴承钢
不完全退火	改善钢中珠光体组织，降低硬度	加热至Ac_3～Ac_1之间保温后缓冷	中、高碳钢，合金钢的锻、轧制零件
再结晶退火	消除加工硬化，恢复塑性	加热至Ac_1以下 50～150℃保温后空冷	冷变形钢材和零件
低温退火	消除内应力达到稳定状态	加热至Ac_1以下 100～200℃保温空冷	铸件、焊接件、锻轧件、机加工件

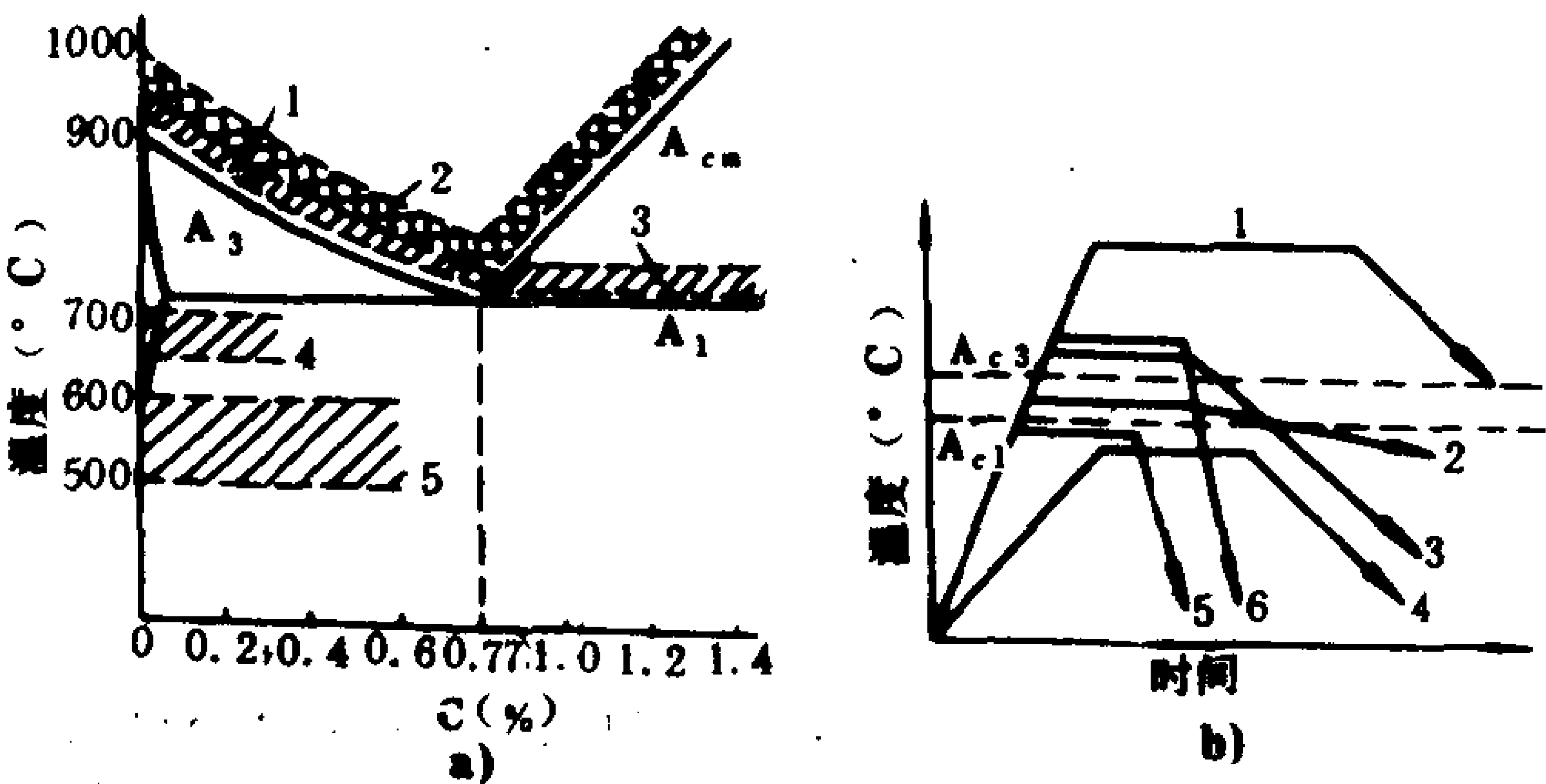


图 3.1.2-5　各种退火及正火工艺过程示意图

a)加热温度范围　b)退火及正火工艺过程

1-完全退火；2-正火；3-球化退火；4-再结晶退火；5-低温退火

1-扩散退火；2-球化退火；3-完全退火，4-低温退火；5-再结晶退火；6-正火

3.2　正火(正常化，常化)

正火是将钢件加热至临界点Ac_3或A_{cm}以上40～60℃或更高的温度，保温后在空气中冷却的工艺过程。正火比退火有较快的冷却速度，可获得更细的层片状珠光体组织，即索氏体，从而有较高的机械性能。也可以代替某些钢件的完全退火以缩短热处理周期。生产中正火常用于：

（1）改善低碳钢的切削性，因低碳钢切屑连续加工困难。

（2）过共析钢球化退火前的预处理。

（3）消除组织缺陷，大多数中碳钢的船机零件锻件毛坯如曲轴、连杆、活塞杆、各种阀件以及铸钢件如锚链均需进行正火处理。

（4）代替大型碳钢件的完全退火。

(5)细化组织，消除过共析钢中的网状渗碳体，使之成为断续的链状。

45钢正火和退火后的机械性能比较见表3.1.2-10

表3.1.2-10　　**45钢在退火和正火后机械性能比较**

状　　态	拉伸强度 σ_b(MPa)	屈服强度 σ_s(MPa)	伸长率δ(%)	收缩率ψ(%)	硬度HB
正火	670～720	340	15～18	45～50	170～240
退火	530	280	32	49	160～200

3.3　淬火

将钢件加热至临界点（对于共析钢和过共析钢，Ac_1+30～50℃；对于亚共析钢，Ac_3+30～50℃）以上，经保温后急速冷却（通常在水、油或其他淬火介质中冷却），使奥氏体转变成马氏体组织的工艺称为淬火。马氏体是碳在α-Fe中过饱和固溶体。当含中等碳量以上时有高的硬度和脆性。同时其它物理化学性能也将发生改变。为获得理想的机械性能必须在淬火后进行回火以调整其组织和性能，从获得良好的机械性能的意义上来讲，淬火可以说是回火的预先热处理。依工件淬硬部位的不同，可分为：

整体淬火：各种整体强化的机械零件、切削工具、模具等；

局部淬火：钳工工具、扁铲、刮刀等及局部硬化的零件，如花键轴的花键部位；

表面淬火：曲轴、凸轮轴、齿轮、气缸套等。

依冷却方式不同，可分为：

单液淬火、双液淬火、分级淬火、等温淬火等。

1)单液淬火　将钢件加热至预定的奥氏体化温度保温后，在单一的冷却介质中完成的淬火过程。通常将奥氏体化的工件淬入水溶液中(碳钢件)或油中(合金钢件)冷却一定时间后再取出在空气中冷却。在水中的冷却时间为每2～3mm有效厚度冷却1s，在低于60℃油中每10mm有效厚度冷却3～6min，在80～150℃油中每10mm有效厚度冷却10～15min。

2)双液淬火　将钢件加热至预定的奥氏体化温度经保温后，先淬入第一种强烈的淬火介质中冷却，以迅速通过奥氏体过冷时的不稳定区，从而抑制其向珠光体转变，当工件冷却至400℃左右时（钢件在水中嘶声减弱），再快速将钢件转入第二种和缓的淬火介质中，使马氏体转变阶段的冷却速度缓慢，以降低其淬火内应力，减少零件的变形和开裂。通常第二种介质为常温油或热油。

3)分级淬火　将钢件加热至奥氏体化保温后，淬入温度为该钢的M_s点以上的盐浴槽内停留，待工件温度与该槽温度相等时，再取出空冷或转入M_s以下温度的浴槽中完成马氏体转变。此方法可有效地减少工件的变形和开裂。

4)等温淬火　将钢件加热至奥氏体化保温后，淬入温度为该钢的M_s点以上的盐浴槽中，进行一定时间的停留，使过冷奥氏体分解为上贝氏体、下贝氏体或下贝氏体和马氏体组织的工艺称为等温淬火。

上贝氏体组织粗大，性能差，一般不使用。

下贝氏体虽硬度略低于马氏体，但具有高强度、高韧性，比容小，并因过冷奥氏体大多转变不完全能保留较多的残余奥氏体，所以淬火应力小，对减少零件变形和开裂更为有效。等温淬火时停留的温度和时间则须根据该钢种的TTT转变曲线和对零件性能的要求选定。

3.4 冷处理

某些钢件淬火冷却至室温后，组织转变并未完成，即尚未达到M_f点(马氏体转变终了温度)。故钢中仍存在一部分过冷下来的残余奥氏体，残余奥氏体是不稳定的组织，在零件受到热作用，应力影响或长时间的室温停留等情况下均将发生转变。残余奥氏体的转变将引起比容、磁性、硬度、耐磨及疲劳性能的变化。这些变化对于精密偶件，精密轴承，高精度量具等都是不利的。为减少或消除残余奥氏体，在钢件淬火后 1 h内进行冷处理，即将淬火件置入零下的温度环境内保持一定时间，一般为 1 ～ 2 h，使工件整体温度达到或接近M_f点，完成奥氏体的全部转变。

冷处理由于处理温度不同可分为：冰冷处理（0 ～ －80℃），制冷剂为固体二氧化碳；中冷处理（－80～－150℃）和深冷处理（－150～－200℃），制冷剂为液态氧或液态氮。

冷处理使零件的淬火应力继续增加，故在冷处理后当零件恢复到室温时应立即回火。

船机零件中的燃油泵偶件，喷油嘴偶件，精密轴承等均在淬火后进行冷处理。

3.5 回火、回火脆性

将经淬火的钢件加热至临界点以下的温度，保温后冷却到室温的工艺称为回火。回火是热处理的最后工序，回火的目的是提高淬火钢的强度，塑性和韧性，降低和消除淬火应力，稳定零件的组织和几何形状，保持尺寸精度。回火后一般在空气中冷却，对于有回火脆性的合金钢，则应采用快速（油或火）冷却。

钢在回火后的机械性能主要决定于回火温度。回火可分为低温回火，150～250℃；中温回火，300～500℃和高温回火，500～650℃。低温回火的目的是获得回火马氏体，保持淬火的高硬度，消除淬火应力和脆性，适当提高韧性，并具有高耐磨性，它主要用于工具和船机燃油系统的精密偶件，轴承及渗碳件等。中温回火的目的是获得回火屈氏体，具有高屈服极限，主要用于弹簧和弹性元件。高温回火的目的是获得回火索氏体组织，具有高韧性，高强度及适宜的硬度和疲劳强度等良好的综合机械性能。主要用于处理承受复杂载荷的中碳钢和中碳合金钢零件，如柴油机的曲轴、连杆、活塞杆等重要零件。淬火后高温回火又称为调质处理。调质处理也常作为氮化前的预先热处理。为氮化零件准备良好的基体组织和性能。不同钢材，回火温度与硬度关系见表 3.1.2-11。

回火脆性：淬火钢在某些温度范围内回火时，其冲击韧性比在较低的温度下回火时还低的现象称为回火脆性。在 250～350℃范围内回火后冲击韧性显著下降者称为低温回火脆性，也称为第一类回火脆性，此种回火脆性无法消除。只能在回火脆性温度区间之外进行回火。某些合金钢如铬钢、铬镍钢、锰钢在 450～650℃回火后缓慢冷却时产生脆性称为高温回火脆性，亦称第二类回火脆性。第二类回火脆性是可逆的，在重复淬火回火中可再现，其消除的方法是回火后迅速冷至室温或者采用在这类钢中加入钨和钼等合金元素的方法加以改善。

3.6 时效

时效是低温回火的特殊形式，是将经淬火或精密机加工的钢件加热至 120～150℃后进行长时间保温以减少淬火应力和加工应力，从而达到稳定组织，稳定尺寸，防止变形而不降低硬度的目的。时效处理主要用于精密偶件，精密轴承，精密丝杠和量具等。

表 3.1.2-11　各种钢的回火温度与硬度

回火温度(℃) / 钢号	回火后的硬度(HRC)							
	25～30	30～35	35～40	40～45	45～50	50～55	55～60	60以上
30	350	300	200	<160				
35	520	460	420	350	290	<170		
40	540	490	430	370	310	<200		
45	550	520	450	380	320	300	180	
40 Mn	540							
40 Cr	580	510	470	420	340	200	<160	
45 Cr	620	530	480	420	340	200	<180	
30 CrMnSi	620	530	500	430	340	180		
50 CrV	650	560	500	450	380	280	180	
35 CrMo	600	550	480	400	300	200		
42 CrMo	620	580	500	400	300		180	
40 CrNi	580	510	460	420	340	200		
37 CrNi 3 A		570	500	420	300	200		
38 CrMoAlA		680	630	530	430	320	200	
40 MnB	650	450						
65	620	550	500	450	380	300	230	<200
70	620	550	500	450	380	310	250	<200
65 Mn	660	600	520	440	380	300	230	<170
55 SiMn			550	490				
60 Si2MnA	620	600	550	520	470	420	380	180
GCr 9		550	500	460	410	350	270	<180
GCr 15	680	580	530	480	420	380	270	<180
T 7	580	530	470	420	370	320	250	<160
T 8	580	530	470	420	370	330	250	<160
T 10	580	540	490	430	380	340	250	<200
T 12	580	540	490	430	380	340	250	<200
9 Mn 2					400	340	280	<200
9 SiCr				500	400	320	250	<200
CrWMn	640	600	540	480	420	350	280	180
Cr 12	650/750	600/700	520/650	470/600	250/550			<1000℃淬火/>1000℃淬火
W 18 Cr4V				720	700	680	650	550 三次
W 9 Cr 4 V						670	640	550 三次
1 Cr 13	580	550	<500					
2 Cr 13	600	560	520	450	<400			
3 Cr 13	620	600	570	540	<500			
4 Cr 13	630	610	580	550	500	<400		
9 Cr 18					580			<150
Cr 18					560	300		<200
15 渗碳后					350	280	220	<160
15 Cr渗碳后					380	330	240	<180
20 CrMnTi渗碳后							240	<180
12 Cr 2 Ni 4 渗碳后							240	<180
18 Cr 2 Ni 4 WA渗碳后							240	<200

3.7 铸铁件的稳定化处理

船用柴油机的气缸套、机架、机座等铸铁件由于在浇注冷凝时因收缩不均匀而造成残余应力，在常温下长期放置或在一定温度下保温，可使残余应力得到一定程度的消除，此过程也称为时效处理。时效处理可使零件避免在使用中因产生应力松驰或重新分布而引起的变形。铸件在常温(露天)放置一年或更长时间，以消除内应力称为自然时效。只有当铸件尺寸过大或过重(超过 10 t)加热设备不足时，方进行自然时效，一般均进行人工时效。人工时效是将铸件放入加热炉中以较低加热速度(60～100℃/h)升温至 500～600℃，保温 4～8 h，以缓慢的冷却速度(30～50℃/h)冷却至 200℃出炉空冷。使用缓慢的加热和冷却，避免产生新的热应力。铸铁件的时效温度与内应力关系见表 3.1.2-12。

表 3.1.2-12　**铸铁件的时效温度与内应力的关系**

铸件材料	400℃以下内应力(MPa)	保温 15 h 后的内应力(MPa)				
		400℃	450℃	500℃	550℃	600℃
普通灰口铁	144	99.6	76.7	36	15	1.2
珠光体球墨铸铁	295	244.9	163	74	34	8
铁素体球墨铸铁	295	249.7	137	54	30	0

3.8 表面淬火

表面淬火是仅使零件表面层淬火的热处理。零件心部保持材质原有的韧性和塑性，表面淬火层具有高硬度、耐磨损、抗疲劳等性能。常用于柴油机的曲轴，凸轮轴，齿轮等。表面淬火的特点在于迅速地使零件表面加热至 Ac_3 以上温度，然后急冷，因而截面上获得不同的组织。表面淬火主要应用于中碳钢(35、40、45)和低合金中碳钢(40 Cr、42 CrMo、40 Mn)。因加热方式不同表面淬火有如下几种：

1)火焰表面淬火

通常采用氧-乙炔火焰喷射到零件表面，由于氧-乙炔火焰的温度高达 3200℃，可使零件表面迅速加热至奥氏体状态，立即喷水淬火冷却，从而获得预期的硬度和淬硬层深度的热处理工艺。与感应加热表面淬火相比较，火焰表面淬火的设备简单，使用方便，特别适用于大型零件的表面硬化和小批量多品种零件的热处理。火焰淬火的淬硬层可达 2 ～ 8 mm，但加热温度不易控制，表面容易产生过热和淬火应力。

采用火焰表面淬火工艺时，必须考虑的工艺因素有下列各点：

(1)淬火温度应高于普通淬火温度。

(2)火焰移动速度为 50～300 mm/min，喷嘴与加热面的距离在 10～15 mm之间选择，以保证其淬硬深度。

(3)喷水器与焰心的距离约为 20 mm。

(4)大型零件表面淬火后可利用余热自身回火，小件回火温度应不低于 200℃。

不同几何形状的零件可采用不同形式的喷嘴和不同的火焰表面淬火方法，见表 3.1.2-13、表 3.1.2-14。

表 3.1.2-13　火焰表面淬火常用喷嘴结构类型

结构类型	外形图	适用工件
平喷嘴		不同尺寸平面工件
槽形喷嘴		吊车滚轮跑道及类似工件
角形喷嘴		机床导轨、压弯辊等
环形喷嘴	a) b)	滚轮、轴颈等外圆表面或筒形工件的内圆表面
夹形喷嘴		齿轮及类似工件
特殊形喷嘴	可采用上述几种形式组合而成	复杂形状工件

表 3.1.2-14 **火焰加热表面淬火方法**

类别	操作方法	特点	应用举例
同时加热	固定法	工件及喷嘴均固定，加热后喷冷或浸冷	较小工件或淬火部位较小的工件，如顶针尖、凹槽、小孔、凿子(工作部位)、钻头等
同时加热	旋转法	喷嘴固定，工件旋转，然后淬火(常用喷冷)	直径及宽度不大的轴颈，M<4 齿轮、轮毂
连续加热	推进法 a) b)	工件与带有喷冷孔的喷嘴相对移动(直线或曲线)，加热与冷却连续进行	大件或大面积表面淬火，如机床导轨、大模数齿轮、刀片、轴类、轧辊、镗杆等

喷嘴移动速度对淬硬层的深度有重要影响，喷嘴移动速度与淬硬层深度的关系如表3.1.2-15所示。

表 3.1.2-15 **喷嘴移动速度与淬硬层深度关系**

移动速度(mm/min)	50	70	100	125	140	150	175
淬硬层深度(mm)	8	6.5	4.8	3	2.6	1.6	0.8

2)感应加热表面淬火

将钢件置于感应圈中，当圈内通入交变电流时，在工件内产生相同频率的感应电势，从而在工件中产生涡流和磁滞现象，引起热效应。涡流在工件中由表面向中心呈指数规律衰减，

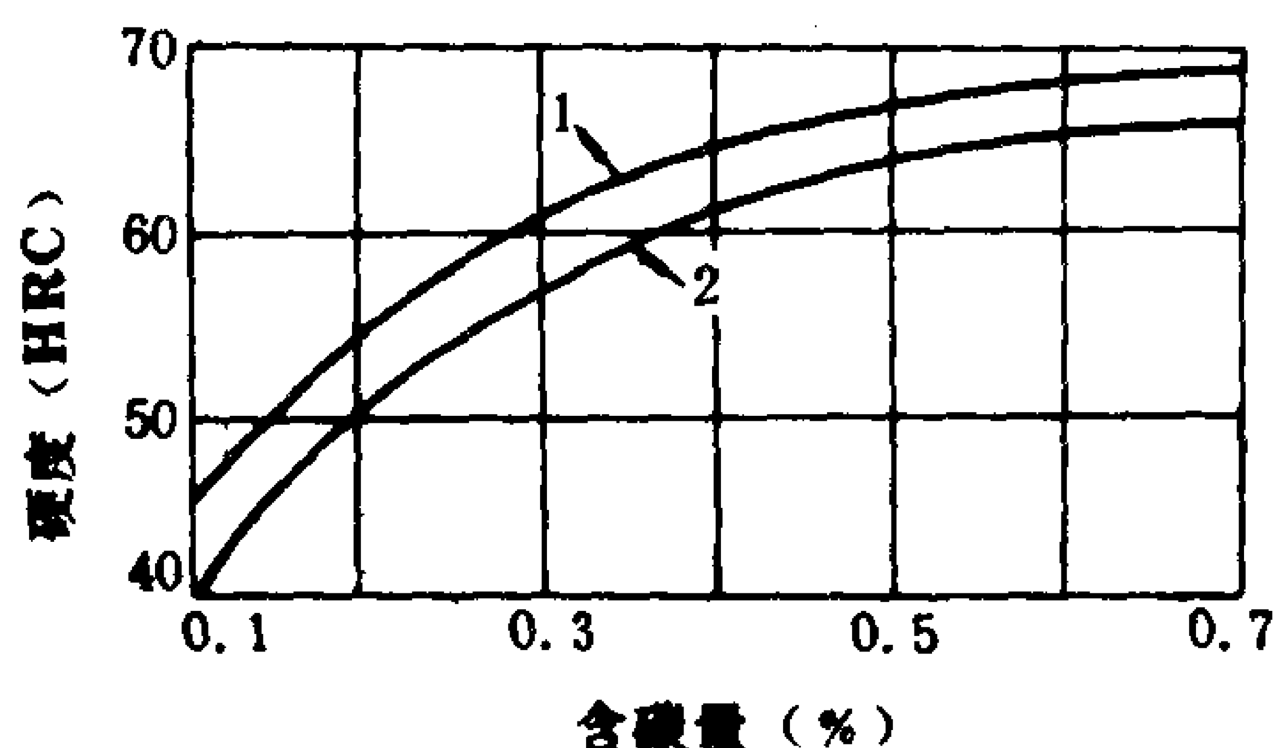


图 3.1.2-6　感应淬火与炉中加热淬火工件的表面硬度
1-感应加热；2-炉中加热

产生表面效应(集肤效应)。电流频率越高，透入深度越小，使 85%以上的热量集中在工件的表面层内。迅速地将工件表面加热至很高的温度，此时可喷射冷却剂进行淬火。按采用的频率范围可分为三种，即：高频 8～250 kHz，中频 500～8000 Hz和工频 50 Hz。感应加热快，几乎不产生氧化和脱碳，变形小，易实现局部淬火和自动化生产，因此应用很广。常用来处理齿轮、凸轮、曲轴、轴、轮毂、蜗杆、量具、工具等，能有效地提高耐磨性及疲劳极限。常用于感应加热的钢材有 35、40、45、40 Cr、45 Cr、40 MnB、42 CrMo、42 SiMn、5 CrNiMo、GCr 15、T 8、T 12、9 SiCr及 9 Mn 2 V 等。

高频淬火频率在 15 kHz 以上，一般硬化层为 1～2 mm；频率在 8～10 kHz之间，硬化层可达 2～8 mm；加热速度可达 200～1000℃/s。淬火后硬度比普通淬火高出HRC 2～5 见图 3.1.2-6。硬度高主要是晶粒细化所致。为保证零件心部性能，高频淬火前常采用调质或正火为预备热处理，淬火后应进行回火。回火后的硬度和回火规范见表 3.1.2-16 及表 3.1.2-17。

表 3.1.2-16　**几种钢材高频淬火与普通淬火后的硬度**

钢种	淬火后硬度(HRC)	
	普通淬火	高频淬火
40	60	62
45	60～61	64～66
18 CrNiWA	48	50～52
40 CrNiMoA	58～60	63～64

表 3.1.2-17　**常用钢表面淬火后回火规范**

钢　种	要求硬度(HRC)	淬火后硬度(HRC)	回火温度(℃)	回火时间(min)
45	40～45	≥50	280～300	45～60
	45～50	≥50	200～220	45～60
	50～55	>50	180～200	45～60
40 Cr	40～45	>50	240～260	45～60
	45～50		200～250	45～60
	50～55		180～220	60～90

表 3.1.2-18　**常用感应表面淬火加热感应器实例**

类　　别	图　　例	适　用　工　作	主　要　尺　寸
高频外表面同时淬火加热感应器		圆柱齿轮及锥角小于 20°的锥齿轮	高度一般小于 15 mm

续上表

类别	图例	适用工作	主要尺寸
高频外表面同时淬火加热感应器		圆柱齿轮及锥角小于20°的锥齿轮	高度一般为15～30 mm
高频外表面同时淬火加热感应器		多联齿轮的小齿轮	
高频外表面同时淬火加热感应器		锥齿轮	
高频外表面同时淬火加热感应器		锥齿轮	
高频外表面同时淬火加热感应器		凸轮轴	感应器与凸轮仿形，尖部间隙4～10 mm，其他部分间隙2～3 mm
高频外表面同时淬火加热感应器		蜗杆	感应器与工件间隙3～5 mm，加热时工件必须旋转
高频外表面连续淬火加热感应器		轴类	
高频平面同时淬火加热感应器		一般端面淬火、锥角很大的锥齿轮	螺旋线间距一般为3～6 mm

续上表

类别	图例	适用工作	主要尺寸
高频平面连续淬火加热感应器		较长的平面	
高频内孔同时淬火加热感应器		内孔	一般2～5匝，匝间距2～4 mm
高频内孔连续淬火加热感应器	导磁体	套类件内表面	感应圈高度6～12 mm，宽度4～8 mm
高频特殊感应器		大模数齿轮（单齿同时加热）	通常用直径为5～6 mm紫铜管弯制
高频特殊感应器		大模数锥齿轮（单齿同时加热）	铜板与齿仿形，长度每边比齿宽短2～3 mm
高频特殊感应器		大模数齿轮（单齿沿齿面连续加热）	
高频特殊感应器		模数5～12 mm的齿轮（齿间连续加热）	感应圈与齿面间隙2～3 mm，与齿根间隙0.5～1 mm，中间竖直导线长8～20 mm

感应淬火所用的感应器见图3.1.2-7。根据被加热零件的形状、尺寸、技术要求、用紫铜制成单匝或多匝形式。不同形状零件的感应器应用实例见表3.1.2-18。

3.9 形变热处理

在金属材料或机械零件的制造过程中，将压力加工（锻、轧等）与热处理工艺有效地结合起来，则可同时发挥形变强化与热处理强化的作用。这种复合强化工艺称为形变热处理。

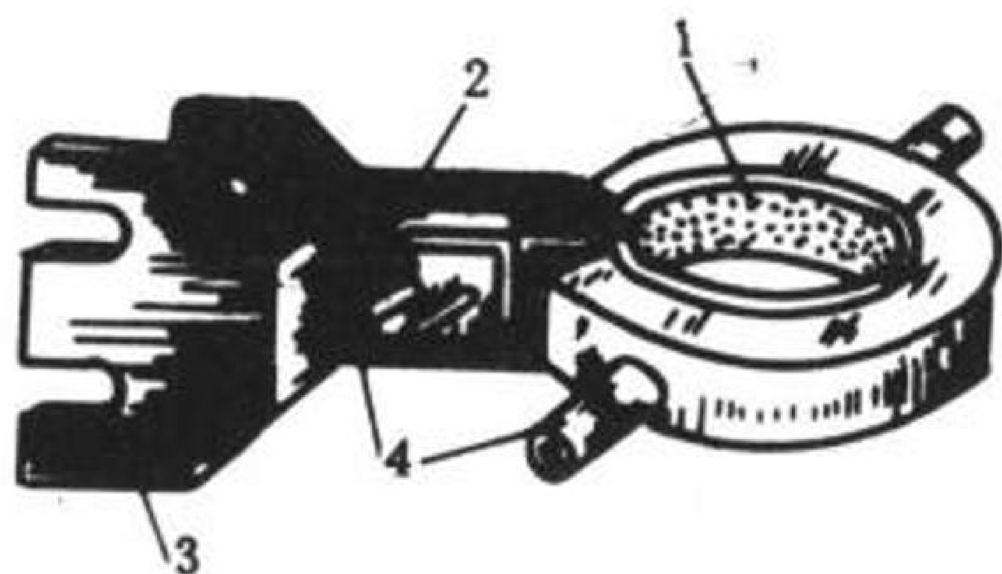


图 3.1.2-7　感应器的组成

1-感应圈；2-汇流条；3-连接板；4-供水装置

形变热处理增加了钢材中的位错密度，加速了合金元素的扩散，可使金属材料和零件获得优异的综合机械性能，节省重新加热的能源消耗，减少材料的氧化、脱碳等热处理缺陷。

形变热处理的工艺方法很多，根据工艺中形变过程与热处理相变的顺序，可分为形变在相变前、与相变同时及相变后 3 种。

1)形变在相变前的形变热处理

包括高温形变淬火（锻热、轧热淬火）、高温形变正火、低温形变淬火等。

高温形变淬火如图 3.1.2-8 所示，是将钢材或工件毛坯加热至稳定奥氏体区，在再结晶温度以上进行变形并淬火的工艺。此工艺在碳钢及合金钢上皆可实现。与常规热处理比较，钢的抗拉强度提高 10%～30%；塑性提高 40%～50%，同时提高了韧性和疲劳极限。

低温形变淬火如图 3.1.2-9 所示。是将钢加热至奥氏体区，保温后急冷至再结晶温度以下而在 M_s 点以上的温度进行形变，然后淬火。此工艺主要用于高合金工具钢。

锻热淬火是将工件或毛坯经高温锻造后立即淬火的复合工艺，实际是形变温度(1050～1250℃)较高的形变淬火。经锻热淬火后的 40 Cr钢制 135 型柴油机连杆的机械性能见表 3.1.2-19。

表 3.1.2-19　　调质处理、锻热淬火后连杆的机械性能

工件名称	处理工艺	σ_b(MPa)	δ(%)	ϕ(%)	a_k(J/cm²)		硬度(HB)
					纵向	横向	
连杆体 40 Cr	锻热淬火	850	20.5	66	166	94	252～292
	调质处理	795	20.6	65.6	165	59	249～255

2)与相变同时形变热处理

将钢加热至奥氏体区，急冷至 A_{r1} 以下的温度，使形变与等温转变同时进行的工艺称为等温形变淬火，如图 3.1.2-10 所示。获得珠光体组织的等温形变淬火对韧性及降低脆性转变温度都十分有利。在贝氏体区转变温度进行的形变等温淬火则能得到极高的强度和满意的塑性。常用于细小的轴类、小齿轮、垫圈、弹簧、链节等。

3)相变后的形变热处理

相变完成后，在高于室温下再进行形变。或称为珠光体冷形变。此工艺多用于高强度线材的生产，如将钢丝加热至奥氏体化，淬入 500～520℃的热浴中，等温转变为细片状索氏体的钢丝，再经冷拔变形，形变量约为 90%，使珠光体和铁素体产生塑性形变，其取向与拔丝方向一致，如此便构成类似复合材料的强化组织。冷形变多用于 60、70、T 7 A、T 8 A和 65 Mn 钢丝的生产，所拔制的直径为 0.14～8 mm的线材强度可达 2200～2500 MPa。冷形变可多次进行，每两次拔丝之间，须进行中间再结晶退火(600～680℃)，以利于形变。此类钢丝在冷绕成型为弹簧后再经低温回火除去内应力方可使用。

4 化学热处理

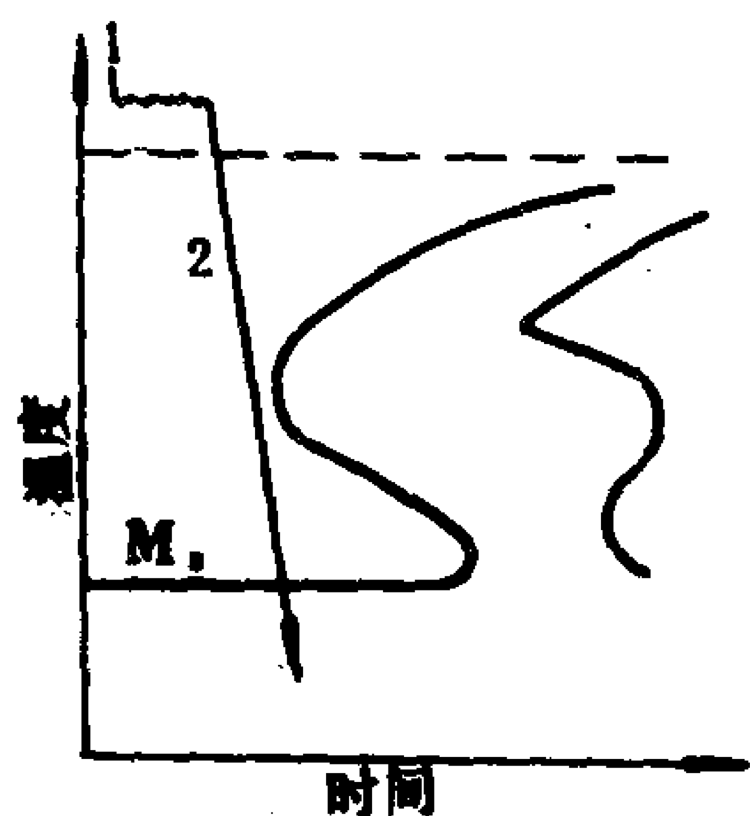


图 3.1.2-8 高温形变淬火工艺曲线
1-形变；2-淬火

为使钢铁零件的表面具有高硬度、高耐磨性、高疲劳强度、耐蚀、抗氧化等各种性能，并保持零件心部的强韧性以适应在弯曲、扭转、冲击和交变载荷条件下工作，或在摩擦磨损、腐蚀疲劳、热作用等条件下工作，采用化学热处理是达到以上要求的最有效的方法之一。

化学热处理是通过渗剂的分解，产生活性原子被零件表面吸收并向内部扩散的过程。

化学热处理方法很多，按渗入元素分有：渗碳，渗氮（氮化），碳氮共渗，氮碳共渗(低温软氮化)，渗硼，渗硫，渗金属等；按渗剂的形态分，有：固体法，液体法，气体法，膏剂法；按工艺条件分，有：真空化学热处理，离子轰击热处理等。

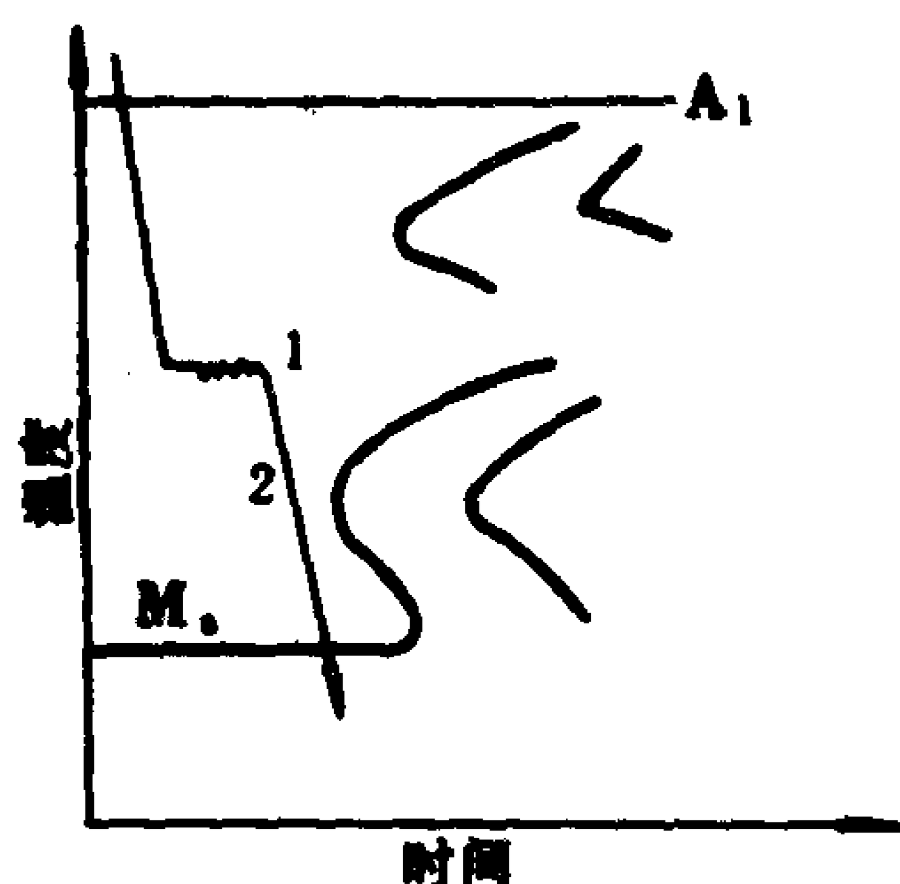


图 3.1.2-9 低温形变淬火示意图
1-形变；2-淬火

4.1 钢的渗碳

低碳钢或低碳合金钢零件在渗碳介质中加热至A_{c3}以上，活性碳原子向零件表面渗入并向内部扩散，使表层含碳量达1%左右，渗层深度可达0.5～2 mm或更深，继之以淬火和低温回火处理，表面获得高硬度、高耐磨性、高疲劳强度，而心部保持低碳钢的高韧性。渗碳常用于柴油机上的十字头销、活塞销、凸轮、齿轮等。

1)渗碳层组织

渗碳零件缓冷后的显微组织如图 3.1.2-11 所示。由表层至心部的碳浓度不同，而呈三个区域。表层是珠光体＋渗碳体的过共析区；次层是珠光体共析区；心部是珠光体＋铁素体的亚共析区。经淬火与低温回火后，表层应为细针状马氏体、粒状渗碳体和少量残余奥氏体。

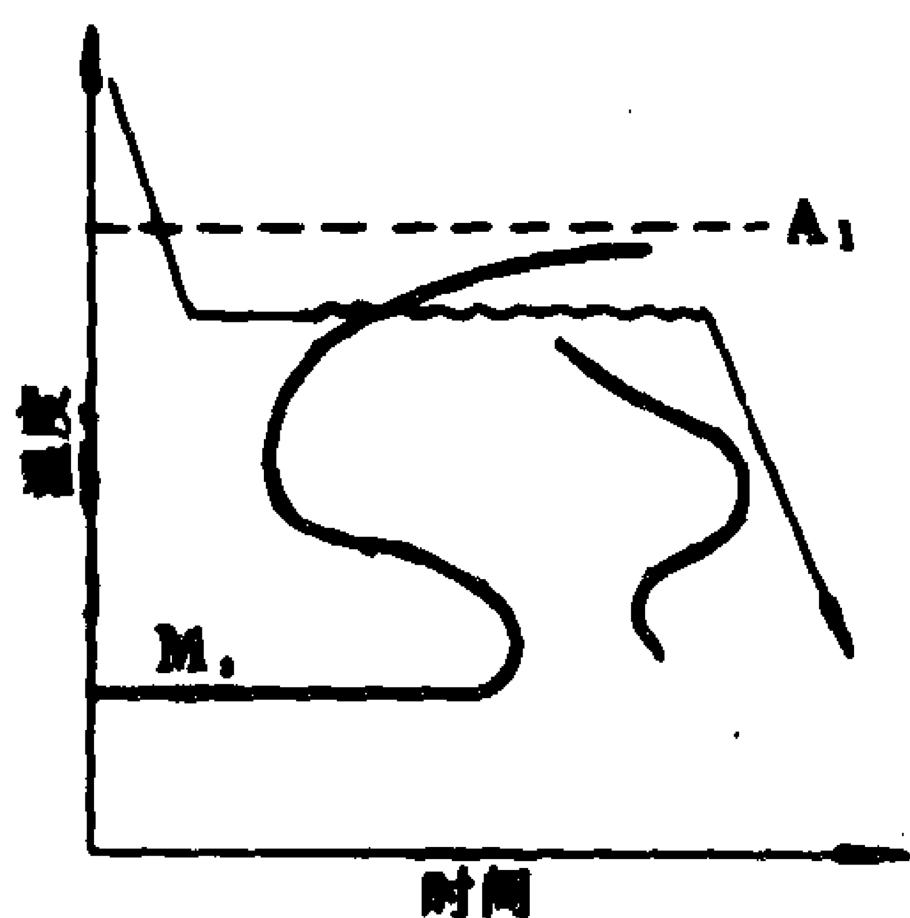


图 3.1.2-10 等温形变淬火工艺示意图

2)渗碳层的成分

低碳钢经渗碳后表面含碳一般在 0.9～1.05%范围内。含镍铬的合金钢含碳量宜为 0.7～0.8%，含锰、钼等合金钢含碳量宜为 0.8～0.9%。要求高耐磨性者可取其上限；要求耐磨又有韧性者可取其下限。渗层的碳浓度梯度的下降应平缓地过渡到心部的浓度。

3)渗碳层深度

渗碳层深度对零件的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度有很大影响，主要表现在零件渗层深度与零件的截面厚度之间的关系上，在复杂的应力条件下工作的零件渗层厚度要求为半径或齿厚的10%～20%。

4)渗碳方法

渗碳因渗剂形式不同可分为固体、液体和气体三种。

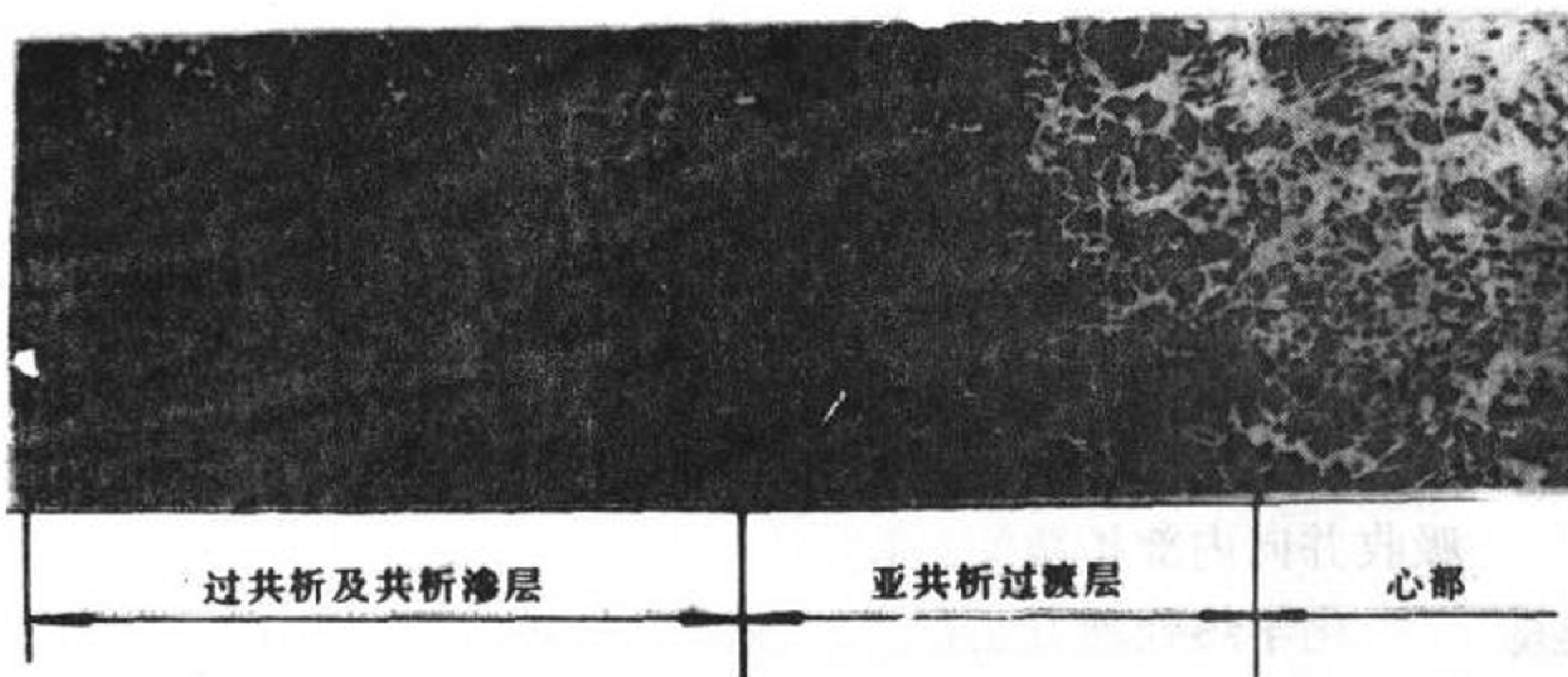


图 3.1.2-11 渗碳层组织 100×

固体渗碳是将零件和渗剂（木炭约占 90%，碳酸钠约占 10%）一同装入渗碳箱中，如图 3.1. 2-12 所示。密封后在炉内加热至 900～950℃，保温时间按 0.1～0.2 mm/h 计，达到时间后，对箱盖板上的试样进行检查，当渗层符合要求时即可出炉，否则应延长保温时间。固体渗碳是最古老的方法，时间长，质量不易控制，生产效率低，劳动条件恶劣，但对于单件或小批生产尚可应用。固体渗碳时对零件的不渗部位应涂以防渗剂（氧化物粉末、耐火粘土等组成）或留有加工余量以便在渗后去除。

液体渗碳过程是将零件在含有氰盐的盐浴槽中进行的，故又称氰化，可获得以渗碳为主渗氮为辅的渗层。目前已废除氰盐，而采用新型无毒液体渗碳剂，其盐浴及渗剂成分见表 3.1.2-20 及表 3.1.2-21。

表 3.1.2-20　　无毒液体渗碳盐浴成分(%)

无毒渗碳剂	NaCl	KCl	Na_2CO_3
1 号渗碳剂 10	30～35	40～45	10
2 号渗碳剂 10	40	40	10

表 3.1.2-21　　无毒液体渗碳剂成分(%)

渗碳剂	渗 碳 剂 的 组 成				
	木炭粉	NaCl	KCl	Na_2CO_3	$(NH_4)_2CO_3$
1 号	50	5	10	15	20
2 号	60	10	10		20

液体渗碳速度高于固体法，参见表 3.1.2-22。

表 3.1.2-22　　液体渗碳的渗层深度和渗碳时间的关系

钢 号	层深(mm) / 时间(h) / 渗碳温度	0.4～0.6	0.6～1.0	0.8～1.2	1.0～1.4
20	930±10℃	2	3～4	4～5	5～6
20 Cr		1.5	3	4	4～5
20 CrMnTi		1.5	3	4	4～5

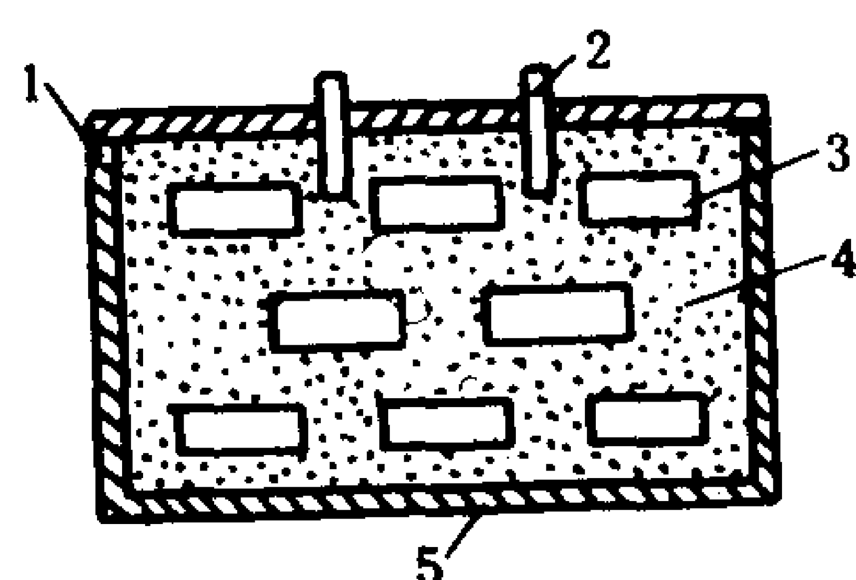


图 3.1.2-12　渗碳箱示意图
1-泥封；2-试棒；3-零件；
4-渗碳剂；5-渗碳箱

气体渗碳过程是将零件装入炉中的渗碳罐内，将渗碳剂引入罐内使之分解为活性原子，被零件表面吸收并扩散而完成的。渗剂有两种形式；一种是有机的碳氢化合物液体，如煤油、乙醇、丙酮等；另一种是含碳氢的可燃气体，如甲烷、丙烷、丁烷和煤气等。采用液态渗剂则用滴注式；采用气体渗剂则通过流量计导入渗碳罐内。气体渗碳前必须对零件进行清洗，预先排出罐中残余气体，保持罐中的正压力。为保证渗碳质量，必须控制渗碳过程中的碳势。常用的控制方法有两种：即固定碳势法和分段控制法。固定碳势法在整个渗碳过程中保持碳势不变，分段控制法则在渗碳周期中前段为强渗增加渗速，后段在较低碳势下扩散以达到渗层的碳浓度和金相组织的合理分布。

5)渗碳后的热处理

(1)直接淬火　零件渗碳后预冷至稍高于心部Ar_3的温度，一般为840～860℃淬火。此法工艺简单。

(2)正火后淬火　将零件由渗碳温度空冷至室温，再加热至心部Ac_3以上温度进行淬火，可使零件心部晶粒细化，然后低温回火。

(3)两次淬火　零件自渗碳温度冷却至室温，加热至880～900℃淬火，以改善渗碳层的碳化物分布并细化心部组织，再加热至Ac_1以上温度淬火和低温回火，以获得均匀分布的碳化物和细针马氏体的渗层。

(4)当要求渗碳件有高的尺寸稳定性时，应在淬火后进行冷处理以消除或减少残余奥氏体，然后再进行低温回火。

常见渗碳钢种的热处理工艺及性能见表 3.1.2-23

表 3.1.2-23　常见渗碳钢种的热处理工艺及性能

钢号	预先热处理			最终热处理			硬度	
	正火(℃)	退火(℃)	硬度(HB)	渗碳(℃)	淬火(℃)	回火(℃)	表面(HRC)	心部HB或HRC
15	900～950		<140	910	780～800 水	160～180	>54	250
20	900～950		156～179	900～950	760～780 水	200～230	58～60	
20 Cr	900～930		156～179	910	840～870 油	200	58～63	250～350
20 CrMo	930～950		179～217	900～930	830～850 油	200	58～63	52～43
20 CrMnT,	950～970		207	900～930	830～850 油	200～220	58～63	35～45
12 Cr 2 Ni 4 A	920～950	640～660	269	910	820 油	200	56～60	35～45
18 Cr 2 Ni 4 A	950～960	640～660	255	920	820 油	200	56～60	35～45

4.2　氰化(碳氮共渗)

氰化即同时在钢的表面渗入碳氮两种元素而以碳为主的过程。由表 3.1.2-21 可看出渗剂中含有氮的成分，在液体渗碳时有氮的活性原子产生并渗入钢的表面。在气体渗碳时，在介质中掺入适量的氨气，则也有活性氮生成。在固体渗碳时向渗剂中加入氰盐(氰化钾、氰化钠)、赤血盐、黄血盐均能分解出碳与氮的活性原子。由于渗碳的温度高，钢对氮的吸收甚少，一般均小于 0.2%，氮的存在可显著地细化马氏体，提高淬火硬度和回火抗力并增加耐蚀性。

4.3 氮化

氮化也称为渗氮，是在钢铁零件表面渗入氮的活性原子，使之形成氮化物的薄层，以提高其硬度、耐磨性、耐蚀性、热稳定性和抗疲劳等性能。气体氮化是指零件置于通入氨气的炉中进行的。

氮化温度远低于渗碳温度，不超过钢的Ar_1温度，变形小，故其应用较广。氮化可以用气体、固体和液体 3 种方法，以气体氮化应用最早。近年来出现的真空氮化、辉光离子氮化，可获得优质的氮化层。氮化对提高碳钢的性能效果不佳，只有对合金钢，特别是对含有合金元素铬、钼、铝、钒等钢铁的作用较为明显，故有称为氮化钢的专门钢种，如 38 CrMoAlA。

氮化常用于改善低碳合金钢冲击件、中碳合金钢曲轴、丝杆、空压机活塞杆、齿轮、柴油机排气阀、气缸套、油泵及油嘴偶件的硬度和耐磨性，也常用于提高高速钢刀具，压铸模具、冲压模具的使用寿命，还用于提高铁素体、马氏体和奥氏体不锈钢的硬度和耐磨性（耐蚀性有所下降）。对于灰口铸铁、合金铸铁，球墨铸铁制的摩擦件均可显著地提高它们的耐磨性和疲劳强度。

零件氮化前应尽可能地消除内应力，且预先热处理的温度（无论对于形状复杂的内应力消除或铸铁件的稳定化温度）必须高于氮化温度 10℃ 以上。对于高合金钢，氮化必须在低于其回火温度下进行，以避免降低零件基体的硬度。

可用于氮化的钢种有 20 CrMnTi、 35 CrMo、 40 Cr、 42 CrMo、 38 CrMoAlA、 3 Cr 5 MoV， 3 Cr 2 W 8 V、Cr 12 Mo、W 18 Cr 4 V、4 Cr 14 Ni 14 W 2 Mo、、1 Cr 13、4 Cr 13、 1 Cr 18 Ni 9 Ti 及各种铸铁，最常用的是 38 CrMoAlA。

1）氮化工艺

气体氮化以氨气为渗剂，靠 NH_3 分解后获得活性氮原子。气体氮化可分为一段、二段、和三段氮化法。氮的渗入浓度与氨的分解率密切相关，故氨分解率是氮化的重要工艺参数之一。加热温度越高，氨的分解率越高，（氨分解后形成分子H_2 和分子 N_2，失去原子H与原子 N 的活性），渗入气氛中的氮势越低，故须控制氨分解温度以控制其分解率。氮化工艺举例见表 3.1.2-24。

表 3.1.2-24　　**38 CrMoAlA 钢分段氮化工艺举例**

氮化方法	工艺参数			渗层深度(mm)
	温度(℃)	时间(h)	氨分解率(%)①	
一段法	510～520 510～520 560～570	20 60 3	18～25 30～40 退氮约 80	0.64～0.67
二段法	510～520 550～560 560～570	20 30 2	18～25 40～60 退氮约 80	
三段法	510 560 520	10 16 18	18～25 35～45 25～35	0.64～0.67

① 氨气分解在分解炉中进行。为消除零件表面的高脆性，采用高分解率即低氮势以降低表面层氮浓度。

气体渗氮后零件表面存在一薄层ε-相，性脆且伴生有疏松，使渗层脆性增高而硬度降低。氮化层的组织疏松与硬度下降情况见图 3.1.2-13。

2)氮化层质量检查

氮化层的质量检查包括：渗层深度、硬度、脆性和疏松。

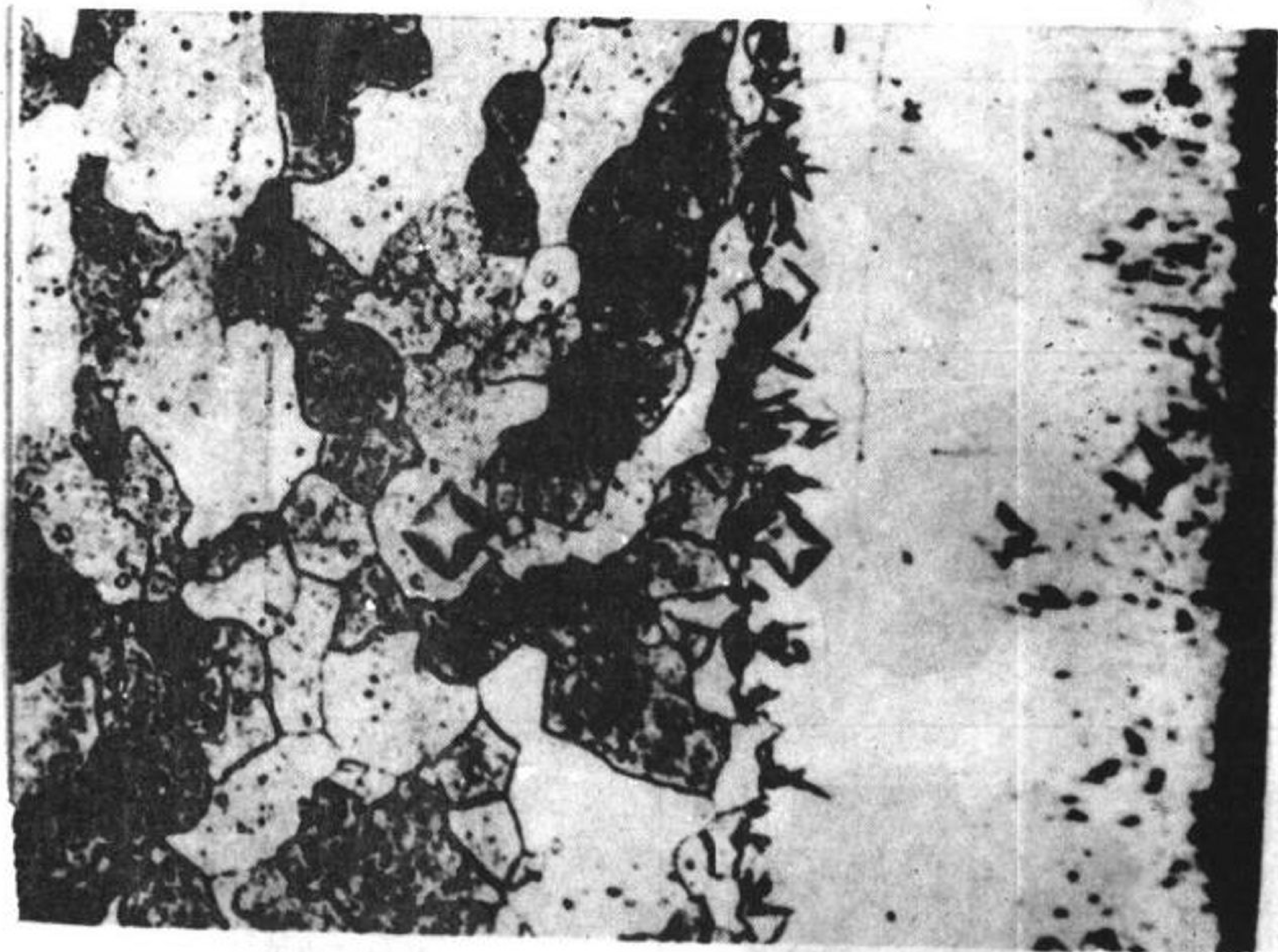


图 3.1.2-13 氮化层疏松 500×棱形为硬度压痕

渗层深度可用断口分析法、显微分析法或淬火法检查。将制成一定尺寸的断口试棒或金相试片，随同零件一起装炉氮化后，敲断断口试棒、用带有读数的 25 倍放大镜观测，或将金相试片磨制后用 2～4%硝酸酒精溶液蚀显后在 100 倍金相显微镜下测量其渗层深度。淬火法是将氮化的断口试棒加热至 700℃，水淬后敲断，渗层处淬成白亮带，其宽度即为渗层深度。

渗层的硬度检查通常是用轻便型洛氏硬度计(HRC 15-N)和维氏硬度计(HV)。为避免载荷过大而压穿渗层，可根据渗层深度选定载荷，见表 3.1.2-25。

渗层的脆性检查是用维氏硬度计在 98.1 N载荷下的压痕完整程度来衡量，其等级标准见表 3.1.2-26。

表 3.1.2-25 氮化层深度与硬度计载荷选用

氮化层深度(mm)	<0.35	0.35～0.5	>0.5
洛氏硬度计载荷 (N)	≤147.15	≤294.3	588.6
维氏硬度计载荷 (N)	≤147.15	≤294.3	294.3

表 3.1.2-26 渗氮层脆性级别

级别	维氏硬度压痕①	说明
1		压痕边角完整无缺
2		压痕一边碎裂
3		压痕二边碎裂
4		压痕三边碎裂
5		压痕四边均碎裂，轮廓不清

① 载荷 98.1 N(10 kgf)，100×。

脆性分 4 级：Ⅰ级，压痕边缘完整不脆；Ⅱ级，压痕边缘有不太规则的崩碎稍脆；Ⅲ级，压痕边缘有无规则崩碎，很脆；Ⅳ级，压痕边缘有大崩陷，全无规则，极脆。其中Ⅰ、Ⅱ级为合格。如通过退氮处理或磨削后再进行脆性检查，压痕符合Ⅰ、Ⅱ级标准时，仍可认为其脆性合格。

氮化层疏松检查是用 10%克分子浓度的氯化铜溶液滴在被检查的表面上，疏松程度不大时，反应出的淡青色最少可保持 2 min；氮化层有疏松及裂纹时，则溶液中铜置换铁离子并析出红色铜的沉淀物，反应呈红色，便可看出缺陷。用金相显微镜对未浸蚀的金相试片进行检测，则能更为准确地测定疏松。

气体氮化的优点是：具有高硬度、耐磨、抗疲劳，但因生成氮浓度高的脆性氮化物，往往在气体氮化后还须进行退氮和磨削加工，以消除表层的脆性和疏松层。

4.4 软氮化

软氮化也称为氮碳共渗。

软氮化是将零件置于活性的氮和碳原子的介质中，在 500～700℃进行氮碳共渗，而以渗氮为主的方法。氮碳共渗的工艺周期短，氮化层薄，约 0.2～0.3 mm，疏松少，脆性低，一般保温时间只需 4 h。软氮化通常是将尿素$(NH_2)_2CO$加入低温盐浴中或送入封闭式电阻炉，使之分解产生氮和碳的活性原子，然后被钢件吸收和扩散完成的。应用尿素热分解，在 570℃氮碳共渗 3 h，其渗层深度与表面硬度见表 3.1.2-27。

表 3.1.2-27　**不同钢种在 570℃氮碳共渗 3 h后的层深与硬度**

钢　种	渗层深度(mm)	表面硬度($HV_{0.1}$)
10、20	0.2～0.4	550～700
45	0.15～0.3	550～700
T 10	0.1～0.2	550～650
20 Cr、40 Cr、35 CrMo	0.1～0.2	650～800
38 CrMoAlA	0.05～0.1	900～1100
W 18 Cr 4 V	0.05～0.1	950～1200

软氮化除采用尿素分解外，也常采用氨与含碳气氛或乙醇、丙酮等液态化合物的气化分解来进行气体氮碳共渗。

4.5 渗硫、硫氮共渗及硫氮碳三元共渗

4.5.1 渗硫

渗硫是通过在液体、固体或气体的介质中加热钢或铸铁零件，使之在表面层形成Fe_2S。FeS 等化合物渗层的工艺。渗硫层有良好的减摩润滑和抗擦伤性能，因渗硫层较疏松，能保持润滑油而显著降低摩擦系数。渗硫层的深度常为几微米至数十微米，硬度低于母材，故主要适用于轻负荷，低速运动的零件，如滑动轴承，低速齿轮，气缸套、活塞等

渗硫剂的成分及渗硫工艺参数举例见表 3.1.2-28。

4.5.2 硫氮共渗

表 3.1.2-28　**渗硫剂的成分及工艺举例**

方　法	渗碳剂成分	工艺参数		备　注
		电流密度(A/dm^2)	温度(℃)	
粉末状	$40\%S+59\%Al_2O_3+1\%NH_4Cl$	—	560～900	
	$75\%FeS+20\%Al_2O_3+5\%NH_4Cl$	—	560～900	表面状态优于前者
硫溶液法	S+1%I+0.2%Fe	—	150～170	渗硫后，600℃扩散退火加工增加流动性，加铁减少工件浸蚀
低温溶液法	$100\%(NH_2)_2CS$	—	90～180	
	$50\%(NH_2)_2CS+50\%(NH_2)_2CO$	—	140～180	
低温电解法	75%KCNS+25%NaCNs	25	180～190	工件为阳极，槽为阴极
	$30\%\sim70\%NH_4CNS+70\%\sim30\%KCNS$	10	150～200	工件为阳极，槽为阴极
气体法	H_2S+N_2或Ar		100～400	

硫氮共渗是使工件表面同时渗入硫和氮的工艺，其目的是综合利用渗硫的减摩与渗氮的

抗磨作用。此法主要用于工具，其工艺特点是共渗时间短，渗层薄，一般不超过 10 μm，通常为 530～560℃，1～2 h。

4.5.3 硫氮碳三元共渗

硫氮碳三元共渗是使工件表面同时渗入硫、氮、碳的工艺，能同时改善钢及铸铁件的耐磨性及减摩性。其渗层组织与渗剂的组成和共渗温度有关。以渗硫为主时，表层有Fe_2S或FeS及α-Fe；以渗氮为主时，表层则形成$Fe_{2-3}(N、C)$及$Fe_4(N、C)$；以渗碳为主时，表层则形成$Fe_3(C、N)$。硫在渗层中能加速氮化物的生长，促使渗层的孔隙增加，而孔隙则有利于润滑摩擦。

硫氮共渗，硫氮碳共渗的渗剂组成与工艺举例见表 3.1.2-29。

表 3.1.2-29　共渗剂的组成与工艺

方　法	渗剂组成(%)	共渗温度(℃)	共渗时间(h)	注
硫氮共渗液体法	30 $BaCl_2$+20 NaCl+50 $CaCl_2$外加盐浴总重量的 5～10 FeS并通入NH_3	450～560	1.5～2	
气体法	NH_3:H_2S=9:10	540～560	1	
硫氮碳共渗粉末法	30～40 FeS+10 $K_4Fe(CN)_6$+50～55 石墨	550～930	4～12	高温氰化
液体法	54$(NH_2)_2CO$+44 K_2CO_3+2 Na_2S	330～380		产生氰根

灰铸铁 HT 200 摩擦片在原始状态渗硫，硫氮碳共渗后磨损试验结果如图 3.1.2-14 所示。

4.6 渗铝

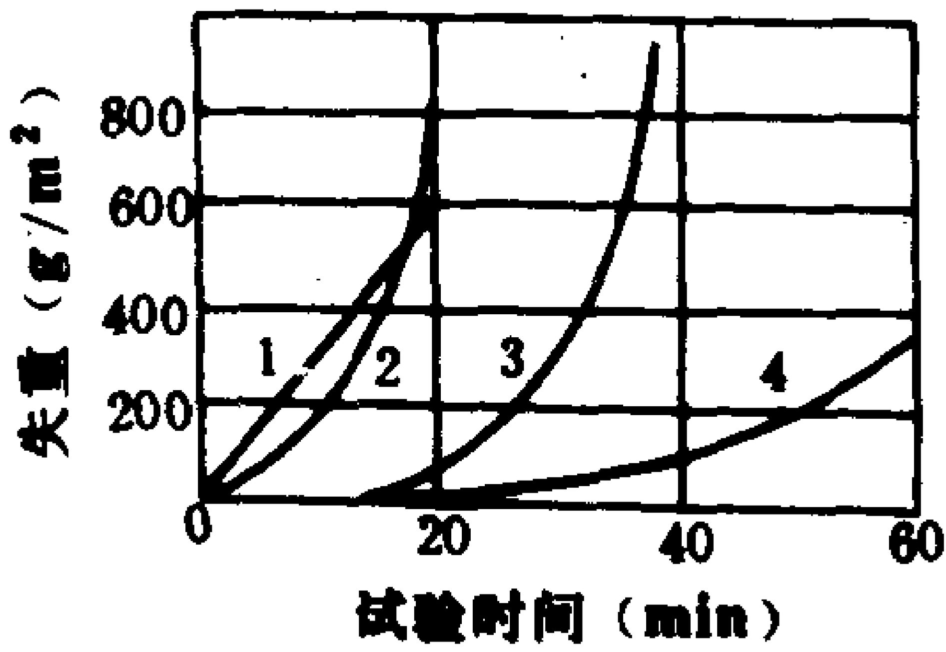


图 3.1.2-14　45 钢-HT 200 铸铁摩擦副经不同处理后在干摩擦情况下的磨损(压力 0.25 MPa，线速度 2 m/h)
1-原始状态；2-渗硫；3-低温氮碳共渗；4-硫氮碳共渗

渗铝是在钢铁零件表面层渗入铝的过程。渗铝能提高零件的高温抗氧化能力和抗燃气腐蚀的能力。

渗铝亦可在固体、液体、气体 3 种介质中进行。液体渗铝是在熔融铝浴中进行，方法简便，但表面易粘铝，渗层不均匀，表面浓度高，脆性大。固体渗铝与固体渗碳相似，须装箱密封，渗剂成分为铝粉或铝铁合金粉加氧化铝粉填充剂及氯化铵催渗剂等。固体渗铝温度为 850～1050℃。扩散速度慢，时间较长。气体渗铝是将钢件置于密封的加热容器中，通入铝的卤化物($AlCl_3$、$AlBr_3$）使之分解并被表面吸收。

零件渗铝后机械性能无显著变化，耐磨性低，在温度条件下的持久强度增加，对燃气及含硫介质耐蚀性增强。在各种温度下的抗氧化能力显著提高，见表 3.1.2-30。

低碳钢渗铝可代替耐热钢制构件在 800～900℃下工作，在轮机工程中得到应用。

表 3.1.2-30　渗铝与未渗铝的钢材氧化速度(g/m²·h)

材　料	590℃ 1000 h		650℃ 1000 h		800℃ 1000 h		980℃ 1000 h	
	未渗铝	渗铝	未渗铝	渗铝	未渗铝	渗铝	未渗铝	渗铝
低碳钢	0.41	0.043			100 h 8.59	0.048		0.1475
0 Cr 18 Ni 9	—	—	0.011	0.006	—	0.033	200 h 0.5240	0.0444

4.7 渗铬

低碳钢渗铬可以代替不锈钢，在燃气轮机叶片、齿轮及石油化工零件上得到应用。渗络方法很多，举例见表 3.1.2-31。

表 3.1.2-31 渗铬方法

方法	渗剂组成	温度(℃)	时间(h)
粉末法	50%铬或铬铁粉 49%$Al_2O_3$1%NH_4Cl	900~1100	8~10
气体法	铬铁氯化铵氢气	900~1100	9~10
盐浴法	在 70%$BaCl_2$30%$NaCl$盐浴中加入络或铬铁	1050	1~5
真空蒸镀	工件与金属铬置于 1.33~0.133 Pa 的真空容器内	950~1050	1~6

渗铬层深度通常为数十微米，硬度达 HV 1300~1800，红硬性好，850℃时仍保持高硬度。渗层可抗各种介质的腐蚀，高温抗氧化性高于渗铝。渗铬温度高，故渗后进行调质处理以改善工件心部的性能，调质处理不改变渗铬层的特性。

4.8 渗硅、铬硅共渗及铬铝硅三元共渗

4.8.1 渗硅

渗硅的钢件对硫酸、硝酸，大多数盐类、海水及弱碱有良好的耐蚀性，并能改善减摩性。渗硅也可提高抗氧化能力，但不如渗铝、渗铬。渗硅方法，渗剂成分及处理工艺举例见表 3.1.2-32。

表 3.1.2-32 渗硅方法

方法	渗剂组成	温度(℃)	时间(h)	层深(mm)
粉末法	75~80%硅铁、15~20%Al_2O_3、5%NH_4Cl	1050~1200	6~10	0.09~0.9
液体法	50%$BaCl_2$50%$NaCl$、15~20%硅铁	1000	2	0.35
熔盐电解法	100%$NaSiO_3$电流密度 0.2~0.35 A/cm²	1050	1.5~2	—
气体法	硅铁或碳化硅+Cl_2+Ar或N_2	950~1050	—	—

渗硅层一般都产生孔隙，它的形成与母材成分、渗硅条件有关。渗硅件在 190~200℃油中浸渍后有较好的减摩性，但渗硅层强度、塑性韧性都低于母材，固之很少应用。

4.8.2 铬铝共渗

铬铝共渗是利用渗铬提高零件表面的耐磨性，耐蚀性和用渗铝提高抗氧化能力的复合渗金属法。可以渗铬后渗铝或二者同时进行。共渗层的抗氧化能力优于单独渗，其脆性低于渗铝，机械性能则优于渗铬。常用共渗法为固体粉末法，举例见表 3.1.2-33。

表 3.1.2-33 铬铝共渗方法

渗剂组成(%)	共渗温度(℃)	共渗时间(h)
50 铬铁、50 铝铁、1 氯化铵	950~1050	5~15
50 铬铁、40 铝铁、10 氧化铝、1 氯化铵	1050	8~10

4.8.3 铬硅共渗

铬硅共渗可获得渗铬的耐磨性，耐蚀性与渗硅的对酸类、海水的耐蚀性。可以先在 50%铬、48%氧化铝及 2%氯化铵中于 1000℃渗铬 4 h，再在通有氯气的硅粉中于 900℃渗硅 2 h，事先渗铬后渗硅，或在 60%铬铁、40%硅铁并通入氯气的 980℃炉中共渗 8 h，可得≥0.1 mm的渗层。

4.8.4 铬铝硅三元共渗

铬铝硅三元共渗多用于提高镍基、钴基合金制造的燃汽轮机零件的抗高温燃汽腐蚀和抗高温氧化的性能。

4.9 离子热处理

离子热处理是在离子氮化的基础上发展起来的一种离子化学热处理。其渗入温度一般都在 650°C以下，可称为低温离子化学热处理。此外，离子渗碳、离子碳氮共渗、离子渗硼、离子渗金属等，一般都在 800°C以上进行，则可称为高温离子化学热处理。

1）离子氮化的基本原理　将待处理的钢铁零件放在真空容器（离子渗氮炉）中，向容器内充入 133～1333 P_a的含氮气体（通常不可无氢，故一般用NH_3、或分解NH_3或H_2+N_2的混合气），以零件为阴极，真空容器壁为阳极，在阴阳极之间加上数百伏直流电压，此时两极间的稀薄气体被电离，从而产生辉光放电。当辉光被点燃后，零件表面布满一层厚约数毫米的蓝紫色辉光。由于容器内的气体被电离，正离子在电场的加速下射向阴极，并在阴极位降区多次和中性气体粒子相碰撞，使中性粒子具有与离子相近的能量达到零件表面。正离子和高能中性粒子与阴极表面碰撞后，一部分动能使零件加热到所需的渗氮温度，另一部分能量的轰击使零件表面的某些铁原子脱离基体表面飞溅出来，这就是所谓阴极溅射。被溅射出来的铁原子可能与在紧靠近零件表面区域内的活性很强的氮原子给合成中性的氮化铁(FeN)，因凝附作用又重新沉积到零件表面。在渗氮温度下，凝附的FeN是不稳定的，会迅速分解为Fe_2N、Fe_3N和Fe_4N各级氮化物并放出氮原子。一部分氮进入零件表面形成渗氮层，另一部分氮再次返回等离子区。在邻近阴极区，氮化铁的形成及在阴极上的沉积是连续不断进行的，如图 3.1.2-15 所示。这种模式一般被认为是氮从等离子区进入零件表面的主要迁移形式，依靠直接轰击注入铁晶格内的氮仅是很少的部分。这种观点又称为铁载氮体理论。

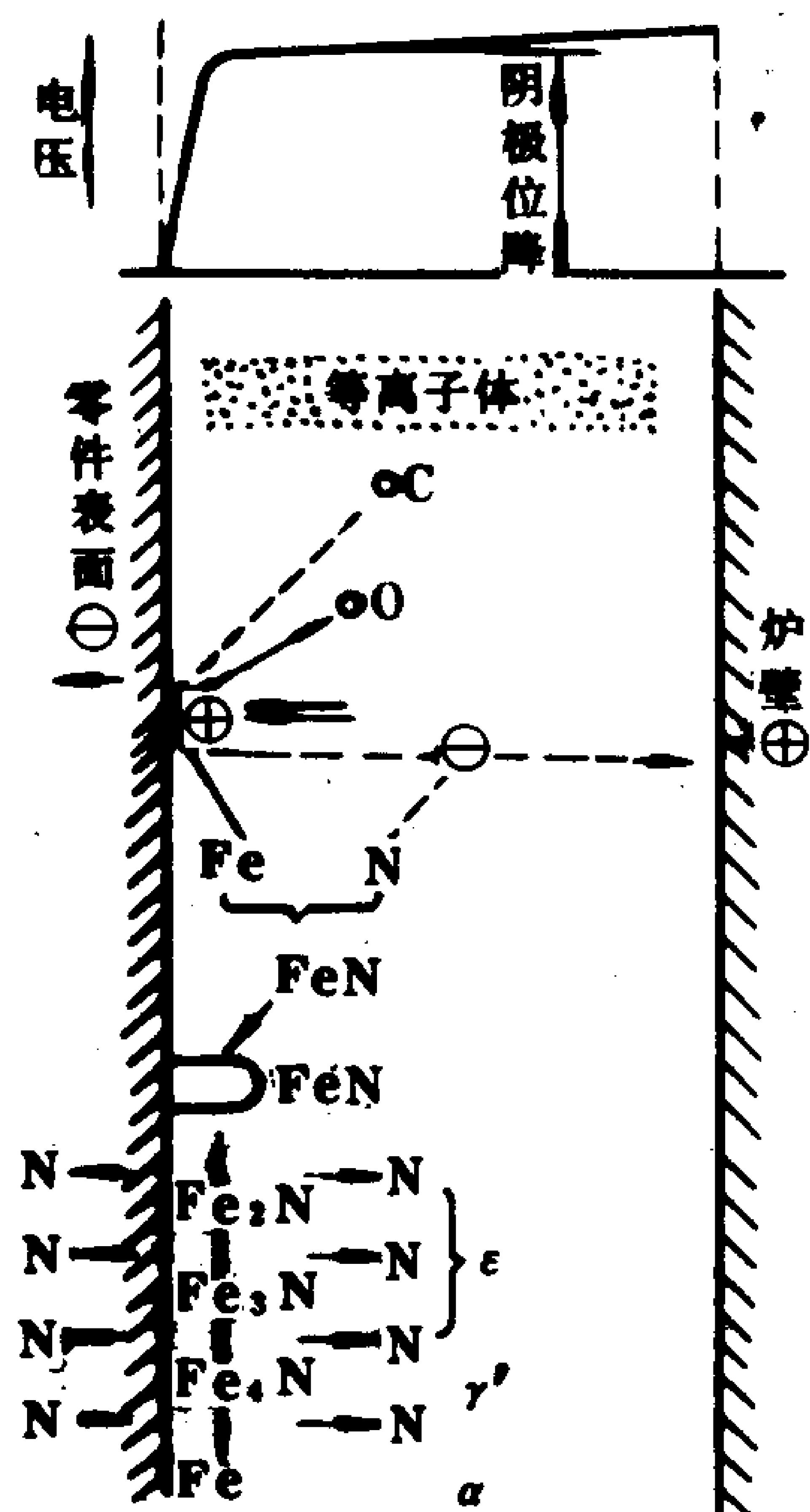


图 3.1.2-15　离子对零件表面的轰击情况示意图

2）离子氮化的特点

（1）渗氮速度快　渗氮是在氮离子的轰击下进行的。处于阴极位降区的离子平均能量约为数十电子伏特，当直流电压为 800 V时，氮离子所具有的能量比气体渗氮时氨分解所得氮原子的能量高 3000 倍。离子氮化时，高能粒子和零件金属表面晶格中的原子产生弹性碰撞而生成高密度位错。通过电子显微镜的观察，高密度位错区可达到 0.05 mm深度，位错运动方向与氮原子扩散方向是一致的，加速了氮在金属中的扩散。氮的迁移主要是通过铁原子溅射和氮化铁的沉积，高速地供氮，在几分钟内表层就出现氮化物相，而气体渗氮出现氮化物相则需要 1 ～ 2 h，并且气体渗氮初期的扩散主要是沿着晶界进行的。在渗氮温度与保温时间相同的条件下，离子渗氮层深度大于气体渗氮层深度。灰铸铁经离子N、C、Ti三元共渗 4 h的渗层组织如图 3.1.2-16 所示。当要求浅层渗氮时，离子渗氮更能有效地缩短渗氮时间。以氮化钢 38 CrMoAlA为例：当要求渗层深度 0.5 mm，离子渗氮约需 20～30 h；气体渗氮则需 40～50 h；当要求渗氮层深度为

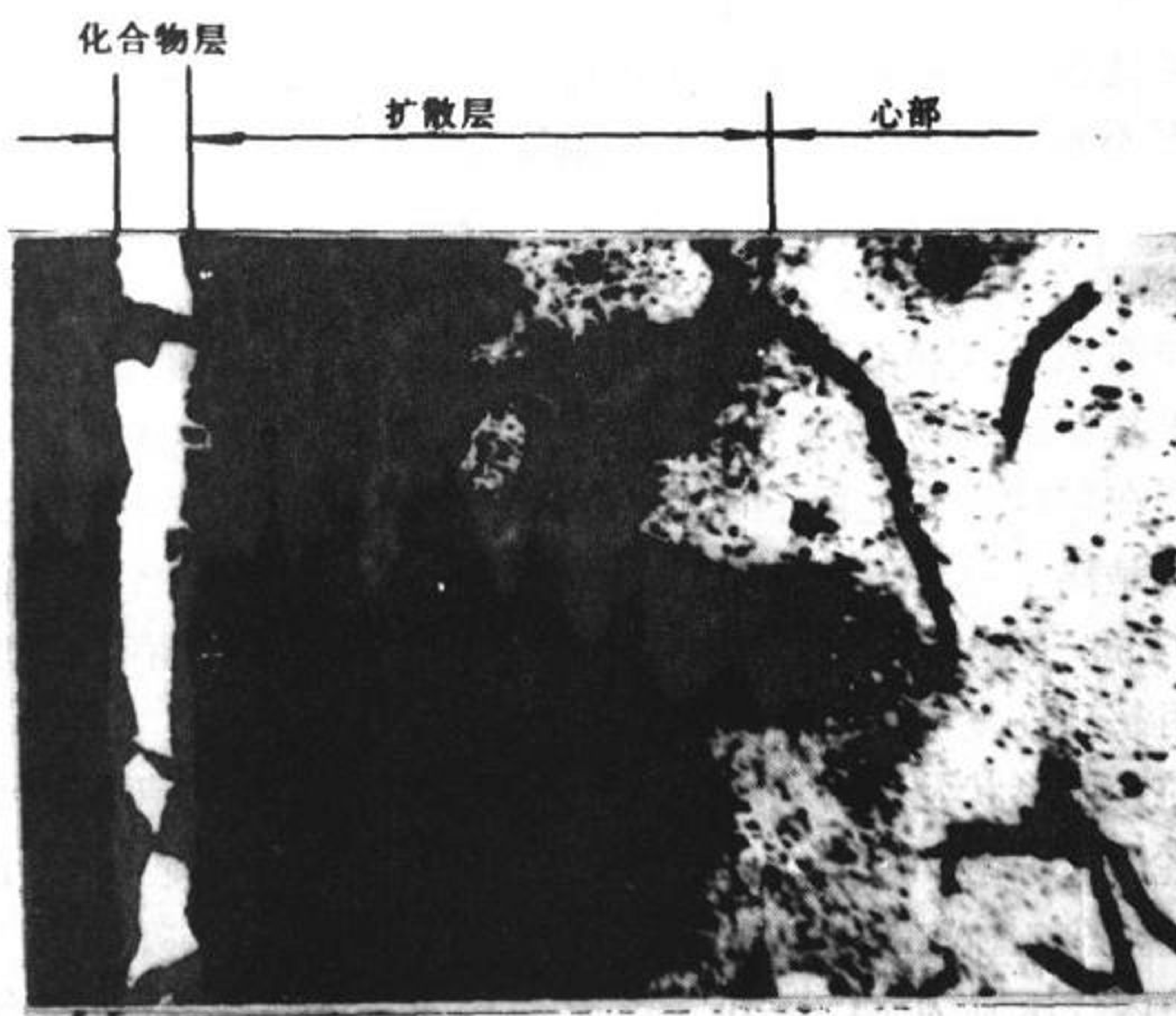


图 3.1.2-16　渗氮层组织HT 200离子氮碳钛三元共渗，4 h 400 X

0.2 mm时，离子渗氮仅需2～4 h，而气体渗氮则需10 h。

（2）渗层组织易于控制，渗层脆性小　离子氮化通过调整气氛的成分就能控制零件表面生成的化合物层组织和扩散层中的氮碳化合物。气体氮化表面形成的ε相（$Fe_{2-3}N$）中含氮量高达8%～10%，ε相本身晶格扭曲，且在渗层中存在大量孔洞，尤其当钢中含有铬铝元素时，化合物层的脆性更高。所以，氮化钢制零件在气体氮化后往往须进行退氮处理，以降低ε相中的含氮量，还要进行磨削加工，将有疏松的脆性化合物磨削掉，零件才能使用。离子氮化所形成的ε相化合物含氮量约为4%～5%，并且渗层中很少疏松，其渗氮层的脆性很小。离子氮化通过控制气氛中氮、氢、碳的含量．可以获得5～10 μm的脆性小的ε单相渗层，也可获得0～8 μm韧性好的γ′单相渗层。离子氮化形成的化合物不仅脆性小，而且致密性好，硬度高，有良好的耐磨、抗蚀性能。因此，零件在离子氮化后通常不再进行加工（根据技术要求有仅进行珩磨或抛光），直接使用。

（3）变形小　离子氮化时，零件表面均匀地覆盖着辉光，电压降主要集中在阴极附近，在高能粒子轰击下，零件各部位升温一般比较均匀，调节电源输出功率就可以控制升温速度，使零件均匀缓慢地上升至渗氮温度。当零件形状复杂，厚薄差别较大时，可采取温度均匀化的措施。离子渗氮的速度快，时间短，零件的变形、孔径的涨缩都小于气体氮化。离子氮化零件外形尺寸一般均稍有涨大，但比气体氮化的涨大量小。这是由于阴极溅射抵消了一部分因氮的渗入引起的体积膨胀效应。氮化零件的棱角处由于相邻的两个表面同时渗氮，结果产生了比其它部位更严重的尺寸膨胀。这对于接触面的承载能力有不良影响，而离子氮化的棱角膨胀很小，因为棱角的尖端效应使阴极溅射强度大于表面的阴极溅射强度。从尺寸增大的数值来看，离子氮化使零件的单边厚度增加约为0.005～0.015 mm。

（4）氮化前不需要去钝处理　不锈钢零件的表层是以氧化铬为主的钝化膜。此膜牢固致密，阻碍氮原子的渗入。气体氮化时，通常须先进行喷砂、酸洗，并在渗氮炉内加入氯化铵等活化剂以除去钝化膜，才能进行渗氮。离子氮化在真空容器中进行，采用含氢的氨气或氢氮混合气，通过电离，辉光放电离子轰击和溅射作用和氢分子、氢原子的还原作用，很容易地除去零件原有的钝化膜，同时还能在渗氮过程中有效地防止新钝膜的生成。

（5）易于实现局部氮化　对局部渗氮的零件，只须对不需渗氮的部位用简单的钢铁材料（板、套、盖等）覆盖住，使被覆盖的部位不直接产生辉光，就可以达到防渗的目的。

（6）节省能源，材料消耗低，无公害　离子氮化与气体氮化相比较可节省电能30%以上；以氨为渗剂时离子氮化的氨消耗量仅为气体渗氮的10%。离子氮化没有公害。

离子氮化的缺点：设备比气体氮化复杂，价格较贵；操作技术要求较高；不同形状和尺寸差别大的零件同时装炉氮化时温度不易均匀；准确测定零件温度比较困难。

3)离子氮化工艺过程

（1）清洗　离子氮化是靠正离子在电场作用下到达处于负电位的零件表面与电子复合，因此，要求零件表面清洁，不应有油污、油漆、龙胆紫等涂料或锈斑之类的覆盖物。这些覆盖物均有绝缘作用，使正离子聚集在绝缘物外侧，当电场强度增加到一定程度时将击穿绝缘层，造成弧光放电，弧光放电会在零件表面上留下可见的伤痕，强烈的弧光放电将导致零件的局部熔化和烧损。所以，清洗是离子热处理的首要工序。清洗可用去油剂或工业洗涤剂，使用含水溶剂时清洗后应加热（250～300℃）烘干。零件的边缘、尖角处不应留有毛刺，孔内不应有残余的钻屑、油垢等。用超声波发生器进行清洗效果较好。

（2）装炉　装炉方式与零件的几何形状及尺寸有关。细长件可采用吊挂，短粗件可平放或堆放，相同零件可叠放，如齿轮仅要求齿面强化时则可叠放。零件间的距离应大于15 mm，且均匀分布。离子氮化装置示意图如图3.1.2-17所示。

（3）抽空　装炉后抽真空至炉内气压降为13.3～67 P_a，然后接通直流高压电源，先给较低电压，点燃辉光，输入微量氨气打散弧，以进一步清洗零件。

（4）工艺参数的选择　辉光点燃后，并不能立即覆盖零件的全部表面。一般须经过打散弧阶段，所谓散弧即炉内任意部位均可产生的小弧光，这是因为零件表面虽然经过人工的清洗，仍能残存有油膜，小的锈点等，经打散弧将它们清理干净后才能逐渐升温。当零件达300℃时，油膜蒸发完毕。升温电流为2.5～5 mA/cm^2，（cm^2为零件的表面积单位）。渗氮温度范围为450～650℃，视零件的钢种而定。离子渗氮的保温时间。视对渗层的厚度要求而定，渗层薄者为4～6 h、渗层厚者可达30 h。炉内气压在渗氮时一般为133.3～1333 Pa，气压大小可由供气量与抽气速度来调节。真空度太高则炉内粒子密度稀薄，渗速减慢；真空度太低则炉内粒子密度增加，同时阴极溅射加强，使凝附量减少，化合物层减薄。保温时的电压为400～800 V，电流密度为1～2 mA/cm^2。

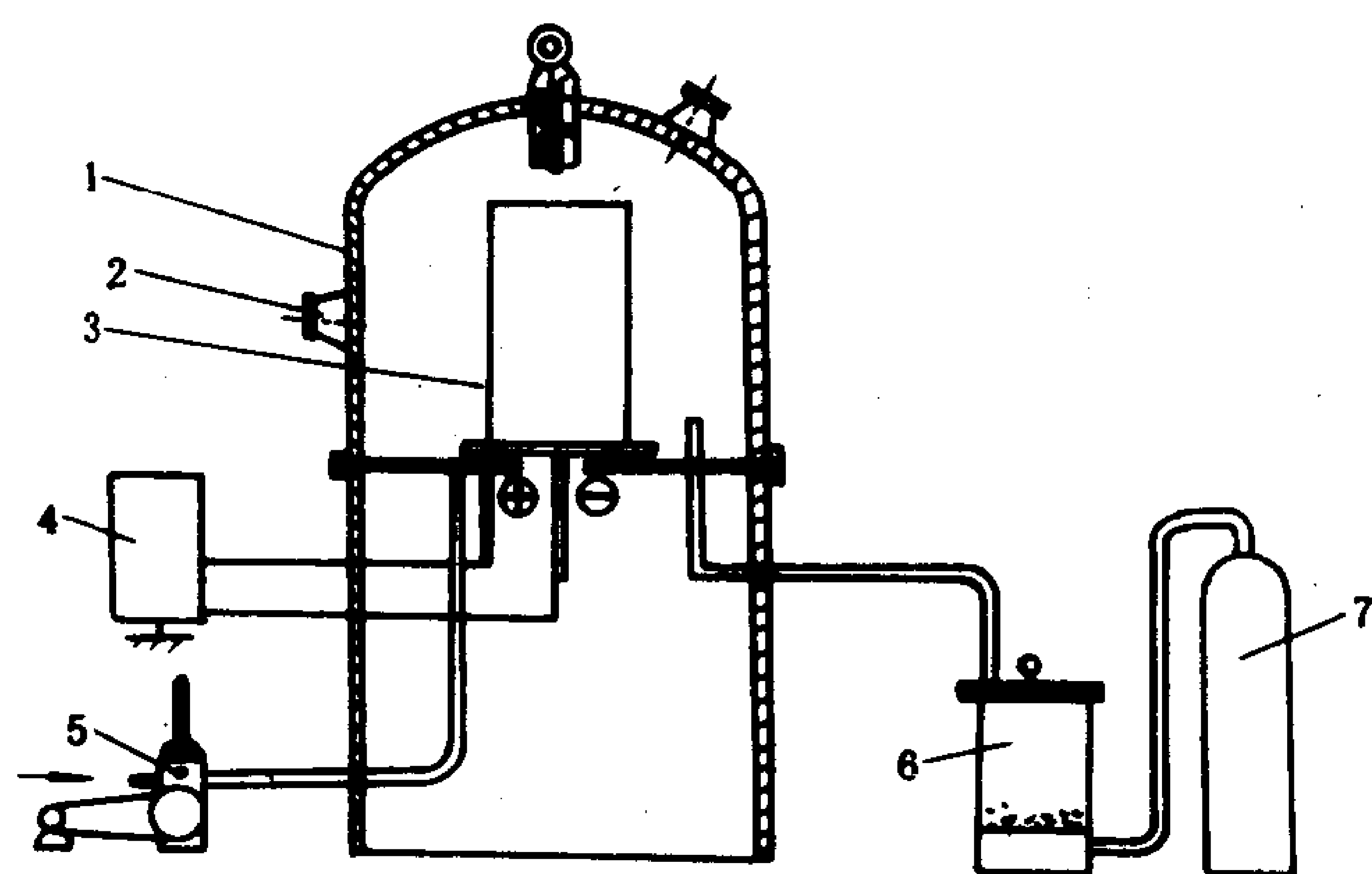


图3.1.2-17　离子氮化装置示意图

1-炉体；2-观察孔；3-零件；4-电源；5-真空泵；6-干燥罐；7-氨气瓶

（5）停炉　保温结束后，先停止供气，切断辉光，继续抽气至较高的真空度停泵，冷却水继续循环，当炉温降至200℃以下时，停水、充气、出炉。

4)离子化学热处理

（1）离子氮碳共渗　在离子渗氮的气源中加入少量含碳的气体可实现离子氮碳共渗，亦称为离子软氮化。它在渗层深度、硬度、疏松、脆性和渗入速度等方

面均不亚于离子氮化并有所超过。含碳气体可以是丙酮、乙醇、甲醇等挥发气体或乙烷、丙烷等可燃气体。

（2）离子氮碳钛三元共渗　在离子氮碳共渗过程中，在阳极上挂装金属钛丝能提高渗速，并得到比离子氮碳共渗更深的渗层、更高的硬度、更强的耐蚀性和耐磨性。钛的作用在于增加了离子源、催化渗入过程。离子氮化、氮碳共渗和氮碳钛三元共渗的渗层深度和表面硬度见表 3.1.2-34。

表 3.1.2-34　**离子氮化、氮碳共渗、氮碳钛三元共渗后的渗层深度和表面硬度**

工艺方法	材料牌号	渗层深度 (mm)	表面硬度 ($HV_{0.1}$)
550 离子渗氮～580°C 6～8 h	20	0.48	400
	45	0.30	500
	40 Cr	0.30～0.50	600
	QT 60-2	0.30	600
离子氮碳共渗 600°C 3 h	20	0.52～0.55	600
	45	0.48～0.50	600
	40 Cr	0.40～0.45	900
	QT 60-2	0.35～0.45	1000
离子氮、碳、钛三元共渗 600°C 3 h	20	0.80～0.85	800
	45	0.50～0.60	900
	40 Cr	0.50～0.55	1000
	QT 60-2	0.40～0.45	1100

（3）离子硫氮碳共渗　在气源中加入少量含硫的气体，可在零件表面获得硫化亚铁或硫化铁的薄层，其厚度约为几微米，此薄膜作为固体润滑剂可使摩擦副的摩擦系数减小，起加快磨合作用。

（4）离子碳氮共渗　将离子热处理温度提高到 800°C以上，在低压气氛中加入 50%以上的含碳气体，就可以实现离子渗碳为主、渗氮为辅的碳氮共渗。其渗碳时间比气体渗碳可缩短 60%，比真空渗碳缩短 30%以上。由于渗碳层中含有少量的氮原素，在淬火时表面层形成含氮马氏体。含氮马氏体具有高硬度、耐磨和较高的回火抗力

5)离子化学热处理的应用

离子化学热处理的应用范围很广，船用柴油机曲轴、气阀及气缸套经离子氮碳钛三元共渗后显著地提高了使用寿命。图 3.1.2-18 所示为舰艇用 150 型柴油机由 38 CrMoAlA 钢制成的薄壁气缸套，经 500 h运行后拆检情况可见离子氮碳钛三元共渗处理的缸套抗穴蚀性能最佳。

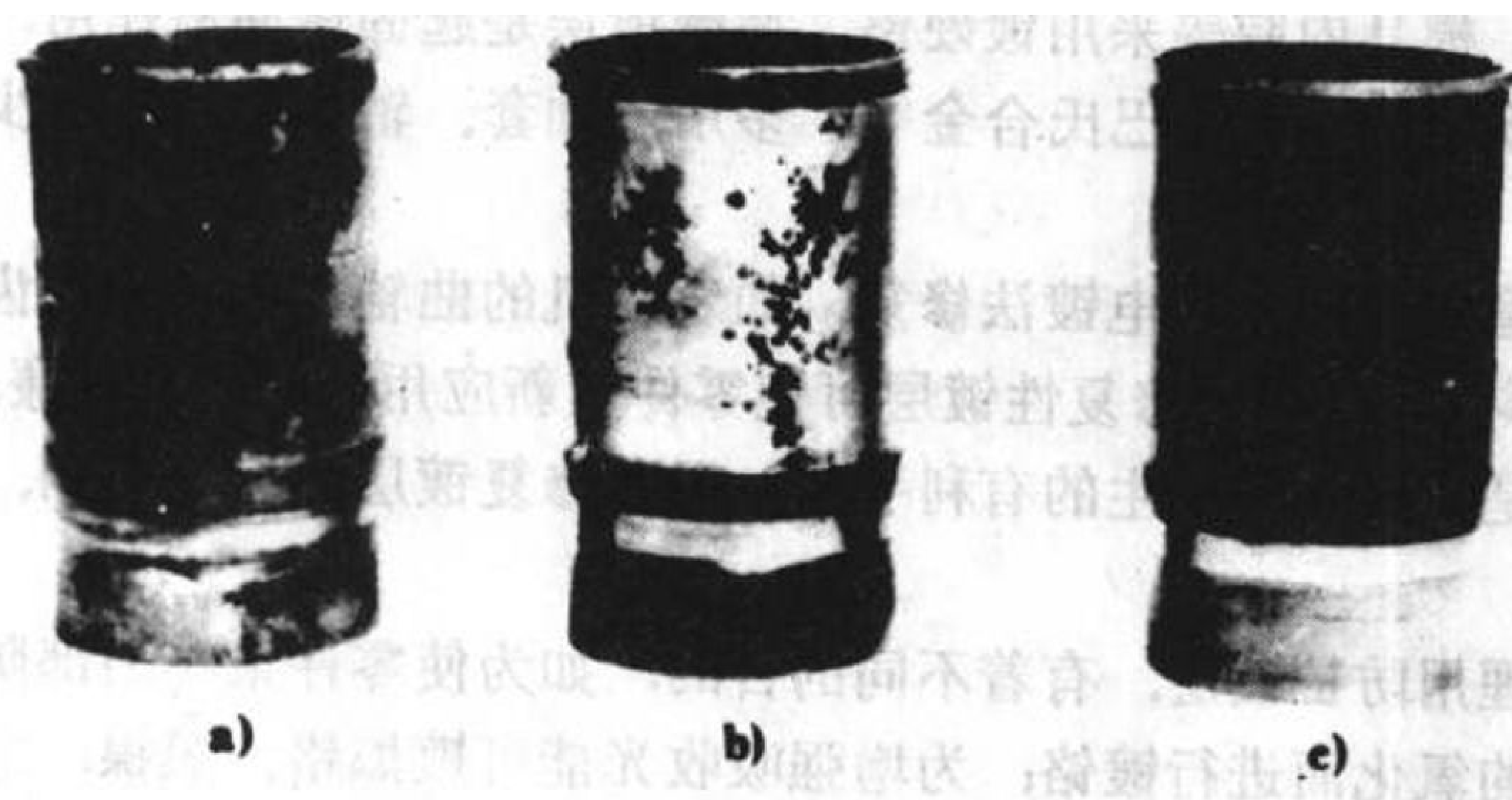


图 3.1.2-18　150 型舰艇用柴油机气缸套运行后拆检情况
a）气体氮化；b）镀铬；c）离子氮碳钛三元共渗

5　金属镀层、氧化及磷化处理

5.1　金属镀层的分类

用电化学方法使金属的化合物还原为金属的过程称为金属的电沉积。如在电沉积过程中，能在金属和非金属制品与零件的表面上形成平滑致密的金属层，则称此为电镀。根据制品与零件的使用要求，可以给它们施以不同性质的镀层，以达到保护制品和零件的目的。

金属镀层可分为两大类：第一类为防护性镀层和防护-装饰性镀层，可用以提高金属制品与零件的抗蚀能力和赋与它们以装饰性外观；第二类为工作镀层，亦称功能镀层，它可使制品与零件表面具有特殊的机械、物理和化学性能，如提高硬度、耐磨性、导电性、磁性、高温抗氧化性、耐蚀性及减少接触面的摩擦，增强金属表面的接受或反射光的能力，修复零件缺损尺寸，便于钎焊，防止热处理时渗碳和渗氮等等。

1)防护性镀层　主要用于防止金属制品与零件的锈蚀。根据母材的性质，使用环境及工作条件，选用不同的金属镀层。在一般大气腐蚀条件下如钢铁可用锌镀层来防护；在海洋气候条件下可用镉镀层防护。当要求镀层薄而抗蚀性能高时，可选镉锡合金镀层，尤其对紧固件的防护，镉锡合金镀层较单一的锌或镉镀层为佳。对于铜合金制造的海洋仪器可采用银镉合金镀层；对于接触有机酸的黑色金属制的容器（食品用）则应选用锡镀层，不仅防锈力强，且腐蚀产物对人体无害。

2)防护-装饰性镀层　这种镀层不仅能防止腐蚀，且赋与制品及零件以经久不变的光泽外观，其应用范围很广，且多半是多层镀。即在基体上首先镀底层，然后再镀表层，有时甚至还有中间层。因为很难找到单一的金属镀层能同时满足防护与装饰的双重要求。如某金属镀层虽耐蚀性强，但质软、易磨损，不能保持光泽，而另一金属镀层虽耐蚀性较差，但能保光泽又耐磨损。将二者加以配合使用则得防护-装饰性镀层。常用的是在基体上先镀以耐蚀但易变色的铜锡合金为底层，再于其上镀一层光亮铬镀层。其它的有铜-镍-铬多层电镀，多层镍和微孔铬镀层。某些贵重制品可采用金或铑的镀层作为防护-装饰镀层，但其造价甚为昂贵。

3)耐磨或减摩镀层　耐磨镀层主要是靠镀层的高硬度提高零件的抗磨能力。如直轴和曲轴的轴颈，发动机气缸套和活塞环、模具内腔等采用镀硬铬。减摩镀层是起固体润滑作用，采用韧性金属锡、铅、锡铅合金、锡铅锑合金、巴氏合金等，多用于轴套、轴瓦上，以减少滑动摩擦。

4)修复性镀层　一些重要零件磨损后，可用电镀法修复，如发动机的曲轴、凸轮轴、齿轮、花键、压轧辊等及机加工超差零件的补救。修复性镀层可使零件重新应用，其成本低廉，镀层性能可达到和超过原来零件，是贵重零件再生的有利手段。用于修复镀层的金属有铜、铬、铁、铁合金等。

5)其它镀层　不同的化学热处理用防护镀层，有着不同的目的，如为使零件某些局部防渗进行镀铜；为防护零件在高温下的氧化而进行镀铬；为增强吸收光能可镀黑铬、黑镍；为增强反光能力可镀铬、银、锡青铜；为提高钎焊可能性可镀铜、锡、铅锡合金；为提高导电性可镀银合金等。

5.2 主要金属镀层的特点及其适用范围

5.2.1 镀锌

电镀锌是应用最广的电镀工艺。在电镀生产中电镀锌占产量的60%以上。其成本低廉。

镀锌层广泛应用于防护黑色金属的腐蚀。钢铁的电极电位高于锌，锌镀层对钢铁而言是典型的阳极镀层。在腐蚀性介质中，金属锌比铁容易失去电子，当镀层有孔隙或因划伤而露出基体钢铁时，锌镀层将作为阳极遭受腐蚀，从而保护了钢铁零件。所以，通常称锌镀层为防护性镀层。但在温度高于70℃的水中，金属锌的电位比铁高，此时锌镀层失去对黑色金属的防护能力。镀锌层的弹性好，当镀件变形或弯曲时，镀层不脱落或开裂，但硬度较低，不适于受摩擦的零件。常温下锌镀层有较高的化学稳定性，但不耐氯离子的腐蚀，所以在海水中的锌腐蚀严重，而在淡水中则较稳定，因此，可用锌镀层防护水管、蓄水柜等容器的腐蚀。镀锌广泛应用于机械零件、线材、板材、紧固连接件、电器元件、仪表底盘等的防蚀。

锌镀层在完全干燥的空气中或没有有机挥发性气氛中才有可靠的防护性能。当在潮湿的空气中含有二氧化碳、二氧化硫、氯化氢、硫化氢时锌镀层将被腐蚀。尤其当锌镀层接触到酚醛类漆、醇酸漆、酚醛塑料、潮湿的木材、胶合板时腐蚀是相当严重的。腐蚀产物呈白色的疏松粉末状。这是少量有机挥发气氛对大气腐蚀的加速作用，在油漆、塑料、树脂、木材等干燥、老化时释放出一些分子态的脂肪酸、氨、酚等的电化学腐蚀作用的结果，时间愈长，腐蚀愈深入，腐蚀产物愈厚。因此，镀锌件应有良好的包装，远离有机挥发气源，放置在通风干燥处。

将镀锌零件在一定组成的溶液中进行处理，使其表面形成一层致密的稳定性较高的厚膜，称为钝化处理。钝化处理的锌镀层的抗蚀能力可提高5倍以上。

5.2.2 镀镉

镀镉的主要目的是在各种金属特别是在钢铁上提供美观的防腐蚀层。镉的塑性好，硬度低于锌，价格高，因此只用于室内外有掩蔽条件下工作零件的薄镀层。但对航空、航海和军工零件来说，室外零件采用镀镉较为普遍。镀镉在干燥的空气中几乎不发生变化，但在潮湿的空气中易氧化成一层保护膜，起保护作用，在海洋和高温大气中保护性也优于锌镀层。

镀镉可不用其它金属镀层作底层。镉镀层抵抗化学物质的能力很低。镉镀层常用于不同金属如钢与黄铜组成的零件或组合件上，以减少电偶腐蚀。电气工业中将镀镉用于钢与其它金属，是由于镉的钎焊性好和接触电阻低。镉本身及其腐蚀产物有毒，且在氰化盐的电解液中施镀，以及价格昂贵，限制了它的广泛应用。

5.2.3 镀铬

镀铬在轮机工程中应用广泛。

1)铬镀层的性质

铬属于电位较低的金属，有强烈的钝化能力，表面很容易生成一层极薄的钝化膜，钢铁零件上的铬镀层是阴极镀层，对钢铁无电化学保护作用，只有当镀层厚度超过20 μm时，才起机械保护作用。在经过抛光的表面，镀铬可以得到银蓝色且有镜面光泽的镀层，故铬镀层有极好的装饰性能。在一定的工艺条件下，得到的铬镀层具有很高的硬度，硬度指标可以超过淬火钢，仅次于金刚石。铬镀层的热稳定性好，在500℃以下，其光泽与硬度均无明显改变。温度高于700℃时，才开始变软并失去光泽。铬镀层表现出贵金属的性能，在潮湿的大气中不起变化，硫酸、硝酸及许多有机酸，硫化氢、碱等，对其均不发生作用。但铬能溶于卤酸及

热硝酸中。铬镀层易剥落，是其缺点。

2)铬镀层的分类及用途

装饰铬镀层用做防护-装饰性镀层，如船舶，仪表等外露部件镀覆装饰铬，其光泽性好，反光能力强，也用于反光镜，镀层薄（0.25～2 μm)。

硬铬镀层又称耐磨镀铬，一些易磨损的摩擦件，如轴，活塞环，凸轮及工量具等用镀硬铬以延长使用寿命。有时也用于修复被磨损的重要零件，铬镀层厚可达1 mm，但镀覆时间很长。

松孔铬镀层，是采用特殊的工艺得到表面具有一定宽度和深度的沟、纹的硬铬镀层，称为松孔铬。铬镀层都有较厚的内应力，而且属于拉应力，当拉应力大于镀层强度时，则镀层形成许多网纹，用化学或电化学法加深和扩大网纹并增加镀层厚度来达到要求。可用于活塞环、气缸套，以提高其耐磨性能。

乳白铬镀层的韧性好，且有一定的硬度，颜色乳白，常用于量具（游标卡尺等）和仪器设备的分度盘的镀覆，提高其耐蚀和耐磨性。

黑铬镀层为黑色，消光性好，用于航海、光学仪器等零件的镀覆，取其不反光及防护的特性。

3)镀铬过程的特点

(1)阴极电流效率极低（$\eta = 8\% \sim 16\%$)，由于电解液的成分不是金属铬盐而是铬酸，绝大部分电能消耗在氢气的析出等副反应上。所以阴极反应复杂，还必须添加一定量的局外离子实现其过程。

(2)电流密度高。

(3)镀铬的阳极不是金属铬而是铅锑合金。

(4)镀铬电解液的分散能力低，对形状复杂零件必须采用仿形阳极，防护阴极和辅助阳极才能得到厚度均匀的镀层。

(5)镀铬电解液中的铬酐是有毒物质，且浓度高，粘度大，零件出槽时带出铬酐很多，废水量大，严重污染大气和水源，必须做好废水处理和控制铬酸雾团以消除对环境的污染。

5.2.4 镀铁

镀铁层属于修复性镀层，是钢铁零件磨损后或加工超差后最有效的恢复尺寸并使之强化的电镀技术。铁镀层与其它修复性镀层（如镀硬铬）及其它修复性工艺相比，具有许多优点，如比镀铬层沉积速度快数倍，镀硬铬的沉积速度小于0.04 mm/h，而镀铁为0.3～0.4 mm/h，一次镀厚能力镀铬为0.3～1 mm，而镀铁为2～3 mm，镀铬生成的铬酸雾有毒，污染环境，废水处理手续复杂；镀铁无毒，废水一般不必处理或仅用电石渣水溶液中和即可排放。镀铬电流效率低，对铸铁件镀覆困难，镀铁高效节能。铁镀层用低碳钢为阳极，成本低，物料消耗少，对碳钢、不锈钢，铸铁基本均有较好的结合镀层。强度可达200～300 MPa，硬度一般为HRC 35～55，可通过电镀工艺控制。与喷焊、喷涂，堆焊等工艺比，镀铁温度低(40～70°C)，变形小，结晶细密。铁镀层的缺点是耐蚀性差，在潮湿的大气中易生成氧化铁，在海洋气候下更易腐蚀。钢铁件在镀铁后可以进行离子轰击氮化处理，这不仅能提高镀件的耐蚀性，且对耐磨性也有很大改善。镀铁已广泛用于曲轴、活塞杆、十字头、活塞销，阀座，端盖，各种套筒、垫片、导板、拖板的修复。

1)镀铁工艺

镀铁工艺分为直流镀铁、不对称交直流镀铁、特殊波形交直流镀铁。

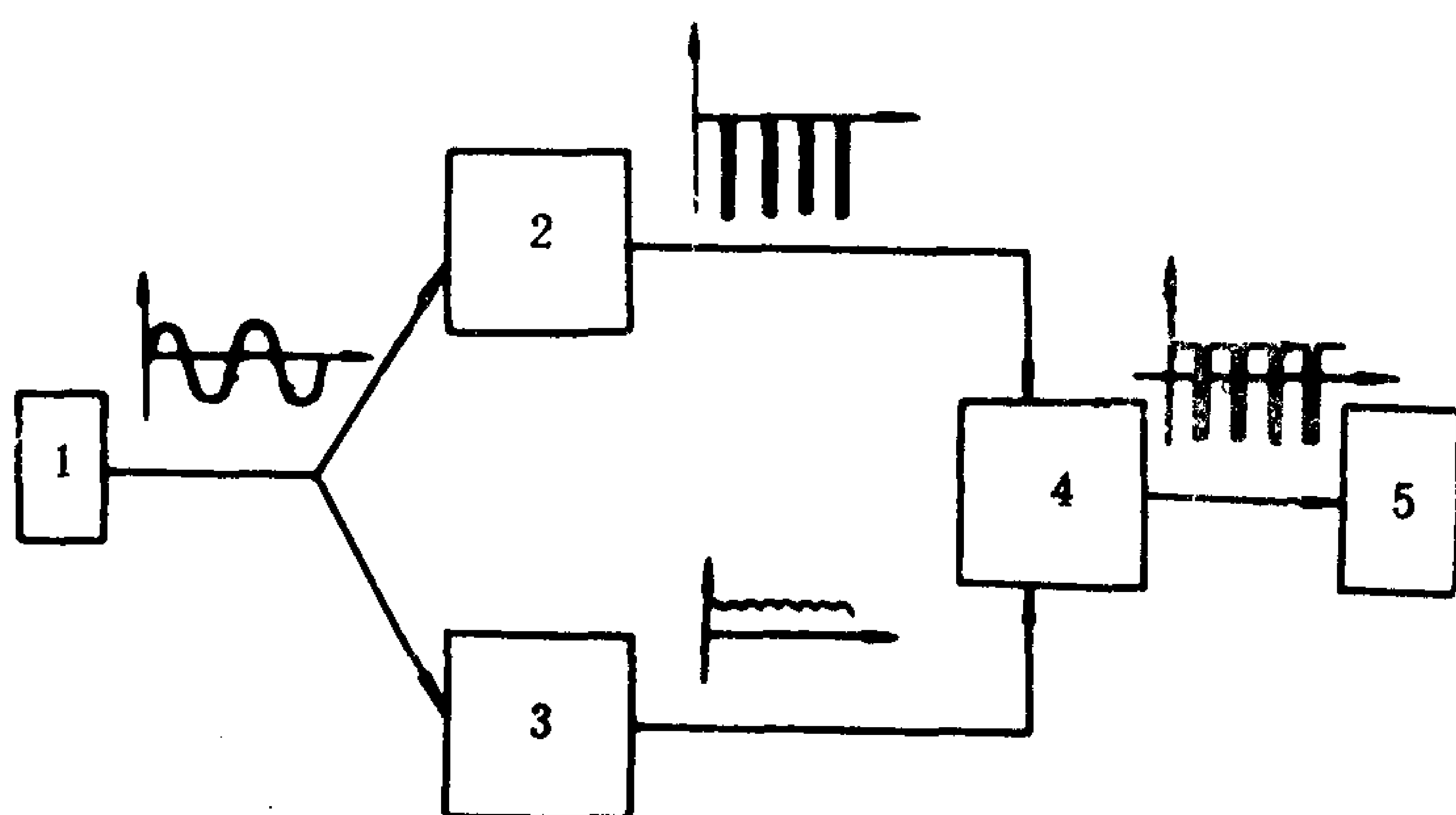


图 3.1.2-19 脉冲串联调制电源方框图
1-市电；2-特殊波形调制器；3-直流电源；4-串联调制；5-镀槽

（1）直流镀铁 直流镀铁在电解液温度不低于 90°C时，获得的镀层内应力小，韧性好，与基体金属结合强度高，但硬度低，耐磨性差。电解液温度不大于 50°C时，所得镀层的硬度高，耐磨性好，但脆性大，与基体金属结合不良，易产生剥离。本工艺的优点是电源简便，操作方便。现已改进为以小电流起镀，在基体金属表面先获得薄而软的镀铁层，再逐步过渡到大电流的硬镀层，使镀层与基体的结合强度得到改善，同时又有高硬度的耐磨表面。

（2）不对称交流-直流镀铁 为满足镀铁工艺的需要，将工业交流电调制成如图 3.1.2-19 的波形。当电流处于正半波时，镀件为阴极，Fe^{2+}正离子与H^{+}在阴极上放电沉积和析出氢气。而在负半波时，镀件为阳极，将已镀上的部分铁和渗入镀层的氢溶解。由于正半波的电流大于负半波，沉积比溶解的铁多，故能获得内应力小于结合强度的镀层。不对称交流正负半波电流值之比叫做不对称比，以β表示之。

即
$$\beta=\frac{I_{ZB}}{I_{FB}}$$

式中：I_{ZB}——正半波电流；

I_{FB}——负半波电流。

当$\beta=1$时，输出为对称交流

当$\beta=\infty$时，输出为整流后的直流

当$1<\beta<\infty$，输出为不对称交流

$\beta=1.3$获得内应力小的镀层，β上升至 6～8，镀层的内应力和硬度相应地增加，$\beta>8$时内应力与硬度不再增加。

先用$\beta\leq1.3$的不对称交流起镀 5～10 min，在镀件表面形成与基体结合良好的软镀层。再不断地调节不对称比β，使其在 10～15 min内逐步平稳地增加至 8～10，即为过渡镀。然后转为直流镀。由过渡镀转为直流镀不可断电，否则将引起分层。本工艺镀层质量优于直流镀铁，因为浓差极化轻，析氢少，氢脆下降；结晶细密，镀层平整、厚度均匀；反向电流减少了晶格畸变，增加韧性。

（3）特殊波形交流-直流镀铁 由特殊波形调制器产生所需的波形，可以更好控制镀层厚度，获得较快的沉积速度和结晶细密光亮且内应力小、裂纹少的镀铁层。其波形如图 3.1.2-19 所示，该波形的特点在于正半波是恒定的平顶矩形波，负半波的幅值远小于正半波，既可发挥负半波的冲击作用又可保持较高的电流效率；波形不间断能消除零电位与低电流密度的不良影响；脉冲频率、正负半波幅值和脉宽均分别连续可调，互不影响，便于选择最佳条件形成起镀层，然后转为直流镀。

2）镀铁工艺过程

镀铁工艺过程包括下列步骤:

(1)除油　可用有机溶剂（石油、汽油）或化学碱性溶液（氢氧化钠、碳酸钠、磷酸钠等）清洗，也可用化学法除油。

(2)除锈　用砂布、钢丝刷或盐酸溶液除锈，清洗。

(3)绝缘　将不需镀覆的部位用塑料布带包扎并浸渍以石蜡松香混合液或赛璐珞溶液。

(4)刻蚀　为去除零件表面的钝化膜并使之粗糙化以提高结合强度，将工件作为阳极，置于硫酸溶液中进行刻蚀。刻蚀后立即将硫酸清洗干净，迅速转入镀铁槽。

(5)起镀　根据所采用的工艺决定其起镀电流或不对称比和起镀时间，一般为 5 ～10 min

(6)过渡镀　由直流小电流转入施镀大电流，或由$\beta=1.3$ 转入$\beta=$ 8 ～10 再转为直流镀，均要求逐步平稳地实现。过渡镀层是结合力好坏的关键，时间一般为 10～15 min。

(7)直流镀　电流密度为 10～30 A/dm²，薄镀层取上限、厚镀层取下限。

(8)出槽　冲洗后检查，合格后中和掉残酸。

(9)去氢　将镀件置于 200～220℃油中加热 2 h。

3)铁镀层组织和性能

(1)铁镀层组织　在结晶过程中受电场作用其结晶成长具有方向性，呈现为垂直于阴极表面的纤维结构，如图 3.1.2-20 所示。测得其晶粒大小为 0.1～0.15 μm，在金相显微镜下观察不到晶界，起镀层很少孔隙和裂纹，与基体结合良好。过渡层中孔隙和裂纹逐渐增加。直流镀层的孔隙与网纹更多是由于电流密度增大时结晶内应力超过镀层本身强度所致。

(2)铁镀层硬度　它的硬度范围宽，起镀层为HV 300，直流镀层为HV 500～800。镀后加热至 200℃以下表面硬度略有上升，超过 400℃时硬度迅速下降。700℃以上镀层的孔隙与网纹消失，硬度约HV 130，晶界明显可见，是再结晶的结果。镀层的高硬度是晶粒细密、渗氢、杂质以及沉积内应力造成晶格歪扭和大量位错所致。

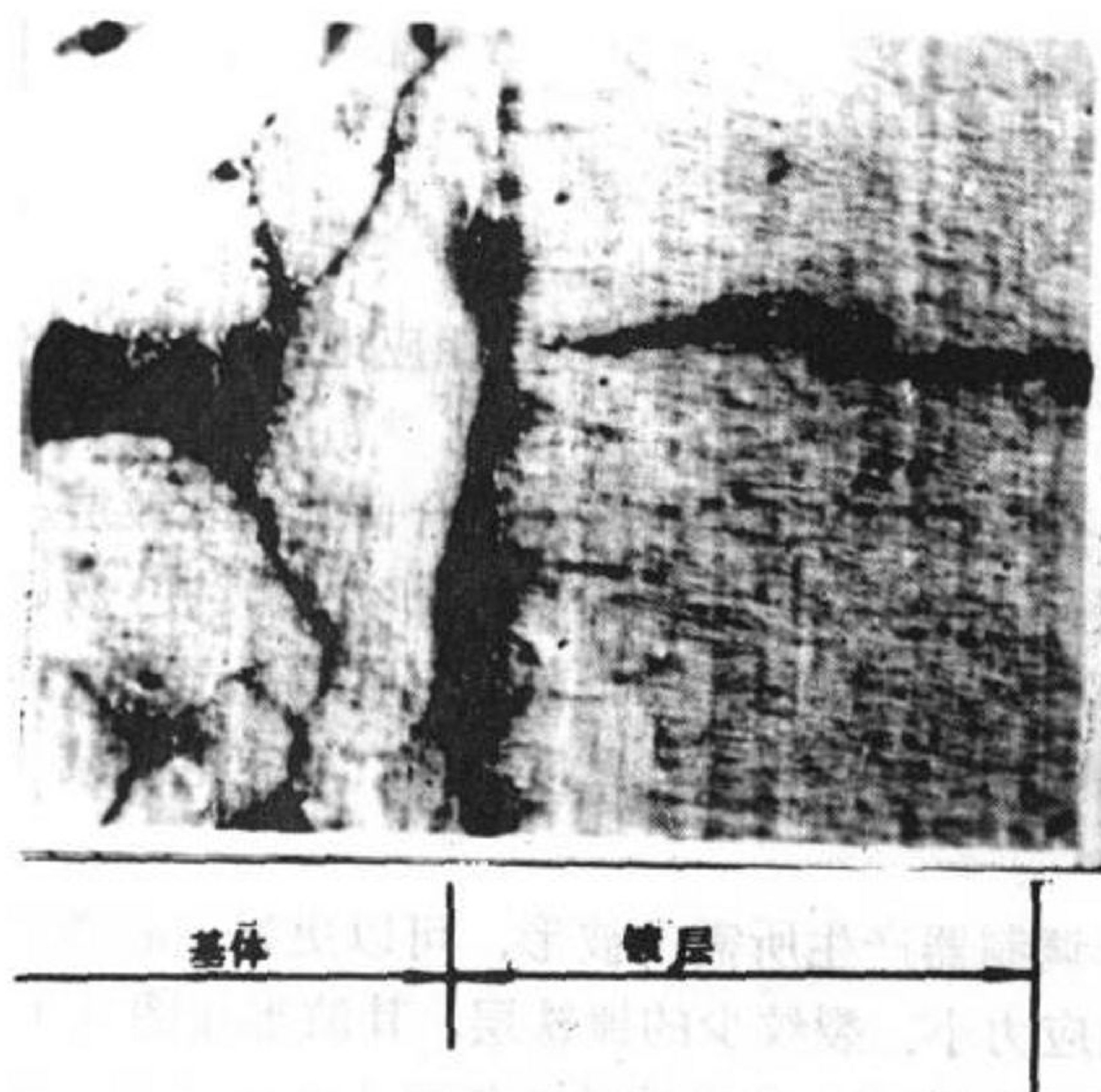


图 3.1.2-20　镀铁层组织 400×

(3)耐磨性　铁镀层具有高硬度、低脆性者耐磨性好。镀层表面的网纹、孔隙成为润滑油的微小贮油池，使耐磨性提高。

4)无刻蚀低温镀铁　常规的镀铁工艺的前处理，均在硫酸溶液中进行阳极刻蚀，然后在氯化亚铁溶液中浸渍去膜，但此工艺不稳定、结合力常达不到要求。无刻蚀低温镀铁新工艺采用在盐酸溶液中强腐蚀，然后在镀液中用对称交流电电解活化，再从不对称交流镀逐步过渡到直流镀。镀层的结合强度达 356 MPa。实物零件镀铁后装机运行取得良好的结果。见图 3.1.2-21 所示。

为进一步改善铁镀层的耐磨性和耐蚀性，在镀铁后进行离子渗扩处理，于短时间内使镀铁的表层上形成数微米的氮化物（白亮）层，其表面硬度、耐磨性、耐蚀性和抗疲劳性同时得到提高。镀铁后离子氮碳共渗组织见图 3.1.2-22 所示。

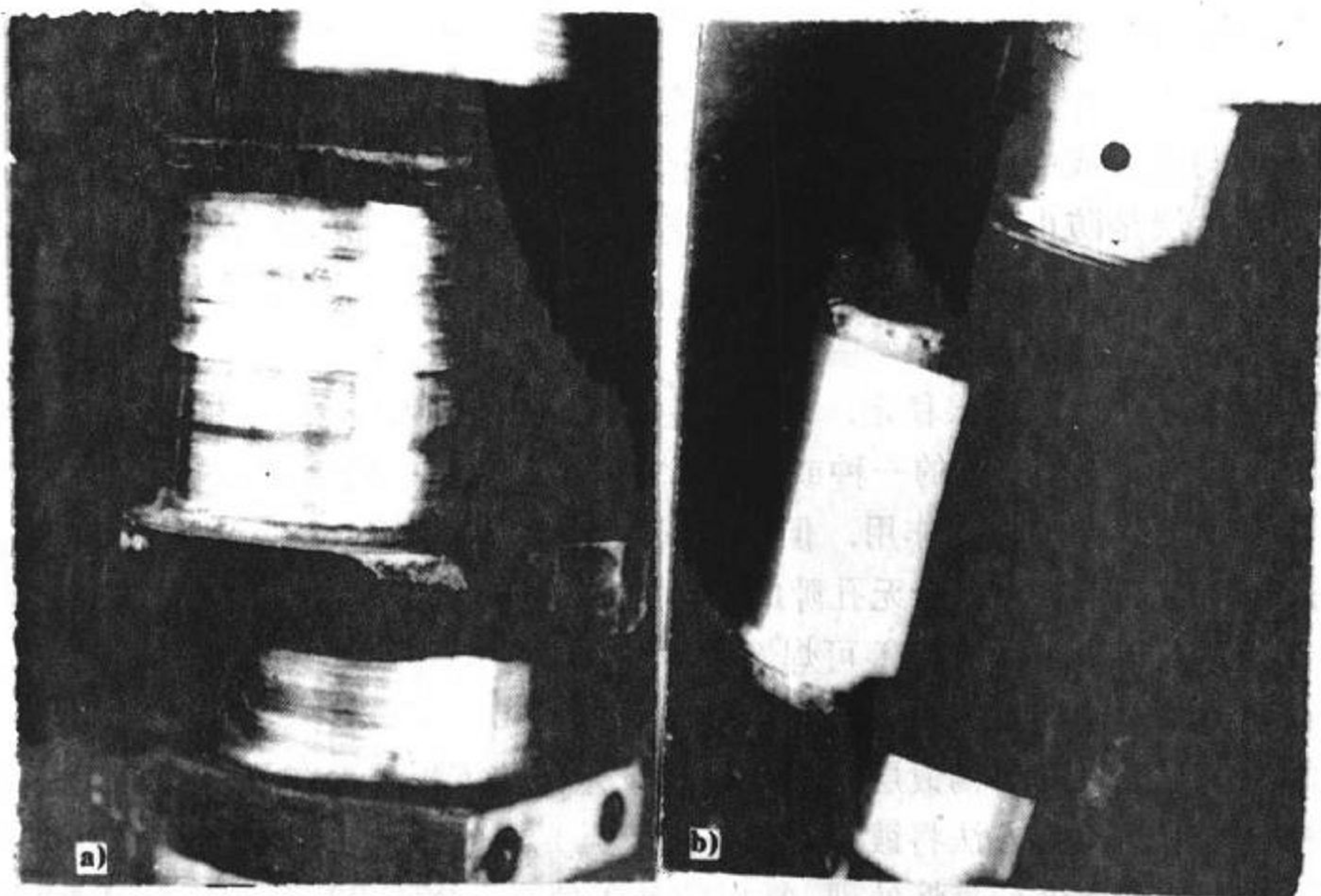


图 3.1.2-21　柴油机曲轴镀铁前后
a）镀铁前；b）镀铁后

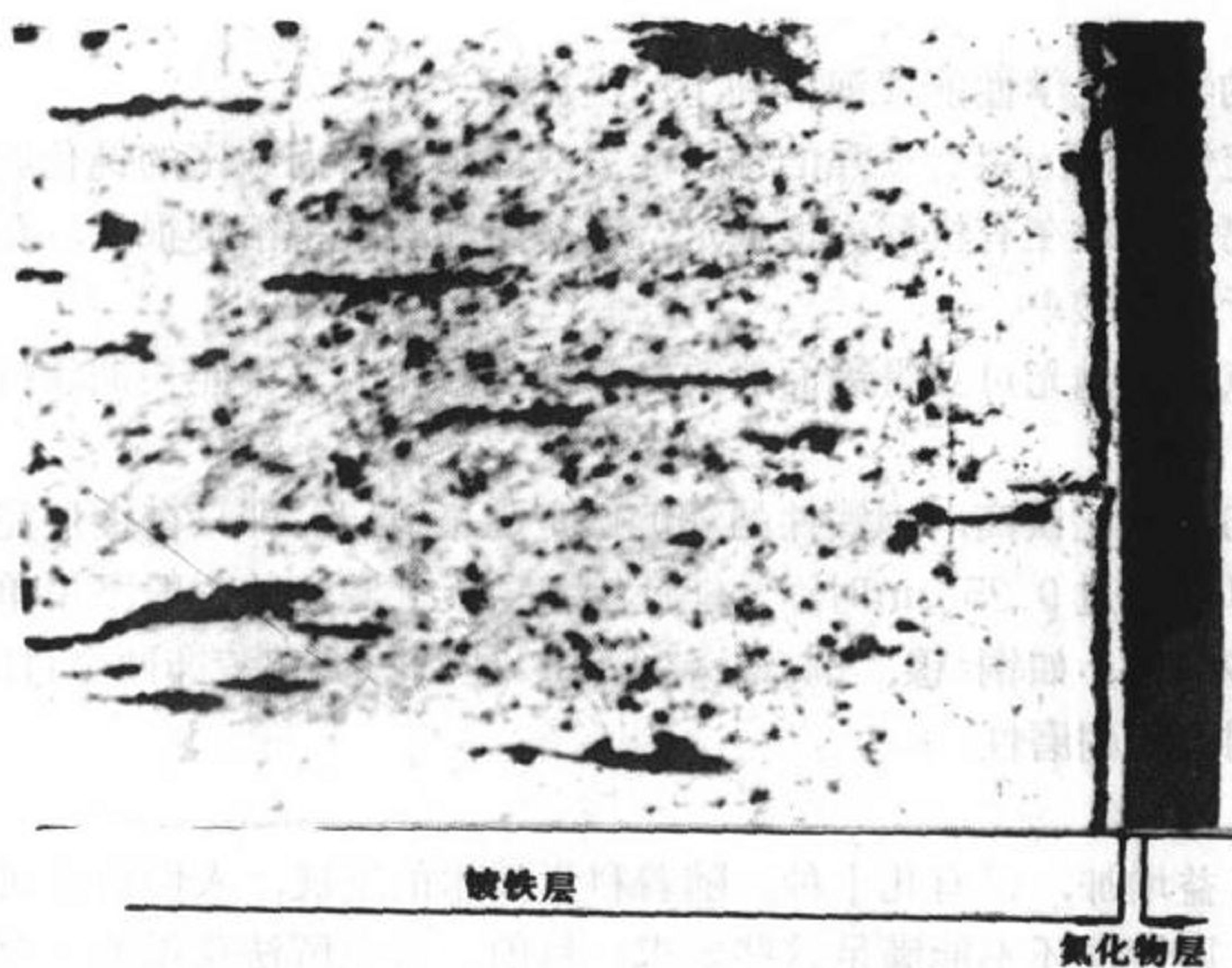


图 3.1.2-22　镀铁层经离子氮碳共渗后的组织

5.2.5　镀铜

铜镀层呈美丽的玫瑰色，性质柔软，富于延展性，易抛光，并有良好的导热性及导电性。铜镀层在空气中易氧化，氧化后迅速地失去光泽。在加热时尤甚。铜易溶于硝酸和加热的浓硫酸中，但在盐酸和稀硫酸中反应很慢。铜的表面受潮湿空气中二氧化碳或氯化物作用，将生成碱式碳酸铜或氯化铜膜；当受硫化物作用时，将生成棕色或黑色硫化物薄膜。

铜的电极电位比较高。因此，在锌、铁等金属上的铜镀层都属于阴极镀层，这种镀层只对基体金属起机械

的保护作用，故要求镀层应完整无孔隙。当铜镀层有孔隙或损伤时，裸露出来的基体金属比未镀铜时的腐蚀还快。

铜镀层常用于钢铁件多层镀覆时的底层，也常作为镀锡，镀金，镀银时的底层，其目的是提高基体金属与表面或中间镀层的结合力并有利于表面镀层的沉积。多层镀覆时铜镀层可节约贵金属。铜镀层是防止钢制零件渗碳。渗氮的良好防渗层，因碳与氮在铜中的扩散极为困难。

5.2.6 镀锡

锡具有耐腐蚀，在大气中很稳定，不易变色，无毒，可焊，柔软且延展性好等特性，它的用途是作为镀层，以发挥上述的一种或多种优点。锡作为钢上的镀层比基体金属的电位高，因此，它不能提供牺牲性的保护作用，但在长久密封的“罐头盒”内，则能起良好的防护作用。锡镀层在足够的厚度条件下是无孔隙的，能抵抗大多数形式的腐蚀。无线电和电子元件，电焊片。铜导线等的锡镀层，除改善可焊性外，还起防护的作用。在轴承，发动机活塞、活塞环上镀锡在磨合阶段能防止拉缸。

由于电解液的组成不同，锡镀层可以是光亮或无光的沉积层，在许多情况下，电镀锡以后采用一种称为“重熔”的方法将镀层熔化，能使无光泽的沉积层变亮，几乎所有的电镀锡钢板和其它一些零件都要进行重熔处理。常用的是在稍高于熔点232°C油脂中浸渍即可。重熔前锡镀层的厚度范围是2.5～7.5μm，能获得完美的光亮表层。

在－30°C以下温度时锡将迅速转变为非金属形的同素异形体，由于组织应力特大而成为灰色粉末。锡与少量锑（0.2%～0.3%）或铋的共同沉积，能有效地抑止这种转变。

锡镀层用于封闭罐头时其内镀层非常薄，约为0.35～1.5μm，并加有机物的涂层；用于改善焊接性能的镀层厚度为5～7μm；根据需要镀厚可达120～250μm。

5.2.7 镀镍

由于镍镀层具有许多优良的物理化学性能镀镍得到了广泛应用。

镍镀层在空气中有很高稳定性，因为镍有很强的钝化能力，能形成薄而致密的钝化膜，它能抵抗大气，碱和某些酸的腐蚀。镍在有机酸中很稳定，在硫酸和盐酸中溶解很慢，在浓硝酸中处于钝化状态，但易溶于稀硝酸中。

镍镀层具有结晶细密的特点，经抛光可获得镜面般的光泽外观，在大气中能长期保持其光泽，故常用于装饰。

镍的标准电极电位为－0.25 V，比铁高，钢铁件的镍镀层是阴极镀层，即只在镀层完整时起机械的保护作用，当镀层厚度超过0.25μm时，才能使镍镀层无孔隙，故一般不用单一的镀镍做防护性镀层。常采用多层镀，如铜-镍、铜-镍-铬等法以达到防护和装饰两个目的，镍镀层的硬度较高，可以提高制品的耐磨性。

5.2.8 镀合金

近来采用电镀合金的种类日益增加，已有几十种。随着科学技术的发展，人们对金属表面性能提出了种种要求。单一金属镀层还不能满足这些要求。目前，用电解法获得的主要是一些二元和三元合金镀层，它们都具有一定的特殊物理化学性能和机械性能。如某些镀层有良好的耐蚀性，较高的硬度和耐磨性，更优美的外观和耐高温性能，优良的弹性和钎焊性等。因而，被广泛地用于防护-装饰性镀层或其它特殊功能的镀层。例如含Sn 70%的Sn-Zn合金镀层，不仅耐蚀性高，且有良好的装饰性能，适于用作热带气候条件下的防护镀层；含Sn 5％～10%的P_b-Sn合金常用作高速发动机滑动轴承摩擦面的减摩镀层；Ni-Cr合金有很高

的耐热性，可作为600～700℃气体介质中工作零件的防护镀层。电沉积可能使互不溶解的金属生成金属间化合物，如固溶体或过饱和固溶体，从而突破火法冶金所不能实现的合金结构。

1）电镀铜锡合金　铜锡合金是国内应用最广的镀种。共有两种类型：一是含锡量为10%～15%的低锡青铜，另一是含锡量为45%左右的高锡青铜，又称白青铜。低锡青铜镀层为金黄色，结晶细密防蚀能力好，厚度达20 μm时几乎无孔隙，能很好地保护基体金属。对钢铁件来说属于阴极镀层，主要用作防护-装饰性镀层的底层。由于它在热淡水中稳定性好，可用以代替锌作为热水中工作零件的防护镀层。高锡青铜具有银白光泽外观。镀层有细小裂纹和孔隙，防护能力较差，但对有机酸、弱酸、弱碱有较好的耐蚀性，在含碳的大气中不易变色。这类镀层硬度高，耐磨，常用于电器零件的触点和反光器。

2）电镀铜锌合金　铜锌合金又称黄铜。在一定工艺条件下，形成的金黄色镀层广泛地用于装饰家用器皿，建筑物的构件及小五金零件。也可在压铸铝合金及锌合金零件上，镀以铜锌合金作为黄铜件的代用品。在钢铁件上镀0.5～2.5 μm的黄铜镀层，可以大大提高钢与橡胶的结合力。黄铜也可以作为减摩镀层。最常用的黄铜镀层含铜68%～75%，其余为锌。为防止黄铜变色，可在镀后浸一层透明的有机物薄膜。

3）电镀铅锡合金　铅锡合金（含锡6%～10%）镀层是很好的减摩镀层，常用于滑动轴承的表面上。含锡较高的镀层能改善零件的钎焊性能。

4）电镀镍铁合金　含铁20%～40%的光亮镍铁合金镀层防腐蚀能力很强，可取代光亮镍镀层，节约金属镍和降低成本。

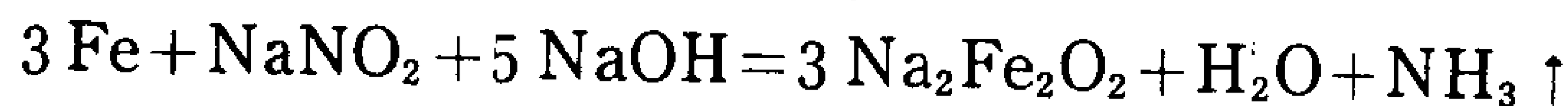
5.3　金属的氧化和磷化处理

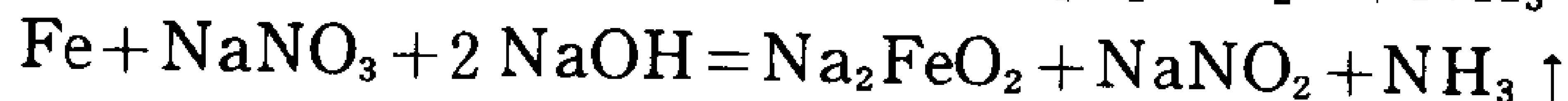
1）钢铁的氧化处理

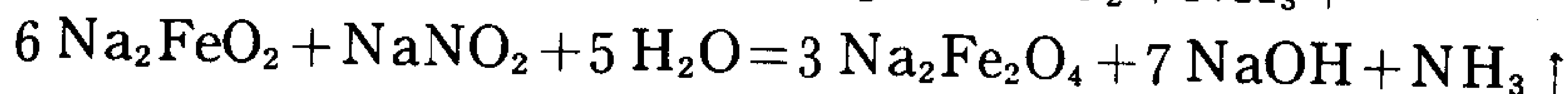
钢的氧化处理又称发蓝或发黑，零件经处理后，表面生成保护性的氧化膜。膜的组成主要是磁性氧化铁（Fe_3O_4），膜的颜色取决于零件的表面状态，材料的成分和氧化处理的工艺制度，一般呈黑色或蓝黑色。铸钢和含硅量高的特殊钢，处理后的颜色呈黑褐色，膜厚约为0.6～1.5 μm，氧化处理不影响零件的精度，氧化膜能提高钢铁零件的耐蚀性，但保护性能较差。如在氧化处理后用肥皂或重铬酸钾溶液处理或涂油处理，能提高氧化膜的耐蚀性和润滑能力。氧化处理常用于机械零件。标准（螺栓、螺母）件、轮、手柄、工具、卡具、仪器、仪表、武器和日用品零件的防护和装饰。

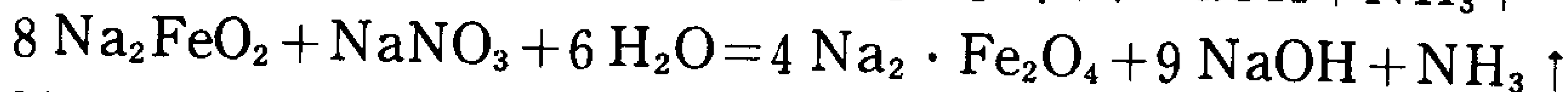
钢铁的氧化处理方法有：碱性氧化法，无碱性氧化法和电解氧化法。经常采用的是碱性氧化法。

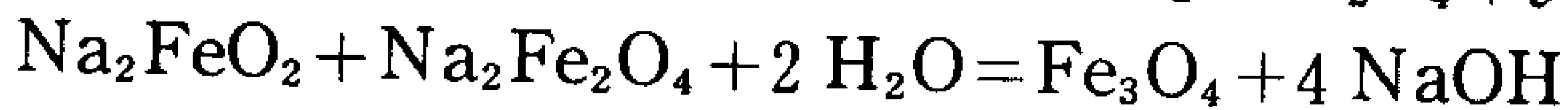
碱性氧化法是在一定温度条件下，在含有氧化剂（硝酸钠或亚硝酸钠）的氢氧化钠溶液中进行。氧化剂和氢氧化钠与铁作用，生成亚铁酸钠Na_2FeO_2和铁酸钠$Na_2Fe_2O_4$，再相互反应生成磁性氧化铁。其反应式如下：


$3Fe+NaNO_2+5NaOH=3Na_2Fe_2O_2+H_2O+NH_3\uparrow$

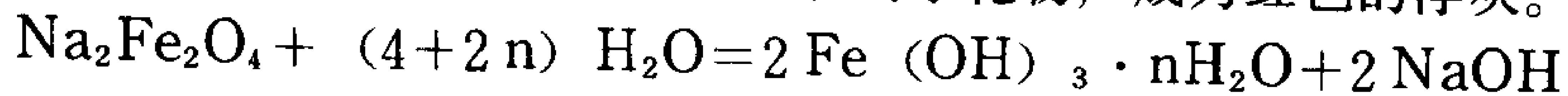

$Fe+NaNO_3+2NaOH=Na_2FeO_2+NaNO_2+NH_3\uparrow$


$6Na_2FeO_2+NaNO_2+5H_2O=3Na_2Fe_2O_4+7NaOH+NH_3\uparrow$


$8Na_2FeO_2+NaNO_3+6H_2O=4Na_2\cdot Fe_2O_4+9NaOH+NH_3\uparrow$


$Na_2FeO_2+Na_2Fe_2O_4+2H_2O=Fe_3O_4+4NaOH$

有一部分铁酸钠水解生成氢氧化铁的水化物，成为红色的浮灰。


$Na_2Fe_2O_4+(4+2n)H_2O=2Fe(OH)_3\cdot nH_2O+2NaOH$

氧化处理的温度和时间与钢中含碳量有关，见表 3.1.2-35。

表 3.1.2-35　　钢中碳含量与氧化温度、时间的关系

钢中碳量 (%)	氧化液温度 (℃)	氧化处理时间 (min)
>0.7	135~138	15~20
0.4~0.7	138~142	20~24
0.1~0.4	140~145	35~60
合金钢	140~145	50~60
高速钢	135~138	40~30

氧化后的处理通常是在 80~90℃的肥皂溶液中浸渍 1 ~ 2 min或在重铬酸钾溶液中浸渍 10~15 min，经清洗，干燥后再在 105~110℃的机油中浸渍 5 ~10 min。

2)钢铁的磷化处理

钢铁零件在含有锰、铁、锌的磷酸盐溶液中进行化学处理，使其表面生成一层难溶于水的磷酸盐保护膜。磷化膜的颜色由于材料成分、磷化工艺不同呈暗灰色到黑灰色。膜的成分主要是$Me(PO_4)_2$或磷酸氢盐$MeHPO_4$的晶体组成。磷化膜在大气条件下较稳定，与钢的氧化处理相比，耐蚀性约高 2 倍以上。在磷化后进行充填处理，浸油或涂漆能进一步提高其耐蚀性。磷化膜呈显微孔隙，因此，对油类、油漆类有良好的吸附能力，故被广泛地用作油漆的底层。磷化膜具有润滑性能，可减少摩擦和拉伤。它还有较高的电绝缘性能，一般变压器、电机转子、定子等电磁装置的硅钢片均用磷化处理，而其机械物理性能基本保持不变。

磷化膜的厚度约为 5 ~20 μm。在磷化膜形成过程中伴随着铁的溶解，所以零件尺寸改变很小。

磷化处理所需设备简单，操作方便，成本低，效率高。保护膜的优点很多，因此，在船舶工业中得到广泛地应用。

(1)磷化处理方法　磷化处理方法有：高温、中温、低温磷化、四合一磷化和黑色磷化处理。

①高温磷化　在 90~98℃温度下进行，处理时间为 10~20 min。优点是膜的耐蚀性、结合力、硬度和耐热性都较高，磷化速度快；缺点是溶液的加热时间长，挥发量大、溶液成分变化快、磷化膜中易夹杂沉淀物，结晶粗细不均匀。

②中温磷化　在 50~70℃温度下进行，处理时间为 7 ~15 min，优点是耐蚀性与高温磷化接近，溶液稳定，效率高；缺点是溶液成分复杂，不便于调整。

③常温磷化　在室温下进行，处理时间为 45~65 min，优点是不需加热，化学药品消耗少，成本低，溶液稳定；缺点是耐蚀性较差，处理时间长、结合力、耐热性都低。

④四合一磷化　将除油、除锈、磷化、钝化四个主要工序在一个槽中完成，称为四合一磷化法(详见机械工程手册第三卷)。此法工时短，便于批量生产、成本低、磷化膜均匀细致，有一定的耐蚀性，适合作电泳漆的底层。

⑤黑色磷化　仪表零件和光学仪器为防止其内壁漫反射，使零件表面形成厚度为 2 ~ 4 μm的黑色磷化膜，具有较高的耐蚀性和耐磨性，可以代替昂贵的镀黑铬、镀黑镍。

(2)磷化膜质量的检查　磷化膜质量检查有浸入法与点滴法两种。

①浸入法　将经磷化处理的零件浸入 3 %NaCl溶液中，室温下保持 15 min，取出洗净，

在干燥的空气中停留 15 min，不出现锈点即为合格。

②点滴法　取硫酸铜、盐酸溶液在室温下滴在磷化膜上，膜的变色时间符合下列规定，不出现锈点即为合格。

厚膜＞5 min；中膜＞2 min；薄膜为 1 min。

5.4　铝及其合金的氧化

铝及其合金的氧化分为化学氧化和电化学氧化

1)化学氧化　化学氧化获得的膜层较薄，其厚度为 0.5～4 μm，质软，不耐磨，耐蚀性低于电化学氧化膜，但吸附能力好，可作油漆的良好底层。化学氧化的优点是：设备简单，操作方便，效率高，成本低，不受零件大小和形式的限制，可处理大型零件或组合件。

电化学氧化膜厚度可达 60～200 μm，它具有高硬度，良好的耐热性和绝缘性，耐蚀性高于化学氧化膜。它的多孔结构有很好的吸附能力。

铝及其合金零件氧化后可以染成各种颜色作为表面装饰用，也可作油漆的良好底层。

铝及其合金的氧化处理在船舶、电气、电子、机械中得到广泛应用。船舶柴油机的铝合金活塞修复翻新后采用硬质阳极氧化能取得了满意的效果。

化学氧化按其溶液性质可分为碱性和酸性溶液氧化处理两种；按膜层性质则可分为氧化物膜、磷酸盐膜、铬酸盐膜等。化学氧化后为提高膜的耐蚀性还要进行钝化或填充。

2) 电化学氧化

电化学氧化也称为阳极氧化。即铝合金零件在相应的电解液中作为阳极，由于电流作用在阳极上形成氧化膜的过程。按其溶液和膜层性质可分为下列几种：

(1)硫酸阳极氧化　在铝及其合金表面形成无色膜层，厚度为 5～20 μm，硬度较高，吸附能力强，易于染色，经封闭处理（浸绝缘漆或石腊）后具有较高的耐蚀性，主要用于防护和装饰。处理温度低、时间短、工艺方便，除大型铸件和组合件外，可用于所有铝合金。

(2)铬酸阳极氧化　在铝及其合金表面形成白色到灰色的膜层，厚度为 2～5 μm，质软、弹性高，膜层与有机物结合力强，多用为油漆的底层或与橡胶粘结件。

(3)草酸阳极氧化　在铝及其合金表面形成银白色、黄铜色的装饰膜层，厚度为 8～20 μm，常用于电气绝缘保护层和日用品装饰。

(4)硬质阳极氧化　本方法的特点与应用如下：硬度高、耐磨性好，膜层的硬度可达 HV 250～500，膜层有大量微孔可吸附润滑剂，耐磨零件的膜层厚一般需 50～70 μm；稳定性好、耐热，它的膜层熔点高达 2050℃，导热系数低，可用于铝活塞或瞬时承受高温的零件，耐热的膜层厚度一般需 70～120 μm；绝缘性好，膜的电阻率极高，经封闭处理后的击穿电压高达 20 kV，适于作绝缘膜层厚度一般需 20～40 μm；耐蚀性好，在大气环境中有良好耐蚀性，在 3％NaCl的盐雾中数千小时不受腐蚀；可利用增加膜层厚度修复尺寸，在一定工艺条件下可使磨损的铝合金的氧化膜层厚度达到 300 μm，并具有耐磨、耐热、耐蚀等优点。硬质阳极氧化法对船用柴油机铝合金活塞的翻新是十分有益的工艺之一。

硬质阳极氧化的工艺要求如下：

①零件不得有尖角、锐边、毛刺等以避免电流集中。

②表面应有适当的粗糙度，以增强结合力，氧化后粗糙度增加一级左右。

③氧化后尺寸增大，所增加的尺寸约为膜厚的一半，故须预先机加工留有适当的余量。

④不要求氧化的部位应绝缘。

⑤氧化后需要精磨才能达到精确尺寸和粗糙度。

铝氧化膜的染色因膜的光亮程度不同而异，纯铝、铝镁、铝锰合金可得到光亮的氧化膜，易于染成各种鲜艳的颜色。铝铜、铝硅合金的氧化膜发暗，只能染成深色或黑色。

6 金属表面的机械强化

6.1 喷丸

用0.5～0.6 MPa的压缩空气使弹丸以50～70 m/s的速度自喷嘴中喷射到铸、锻、焊或铆接工件上，这些工件在转速为2～3 r/min的工作台上旋转。喷丸处理能有效地提高金属的疲劳性能，同时能将粘附在工件表面上的型砂、氧化皮、焊渣等清除。喷丸方式及应用见表3.1.2-36，表3.1.2-37。

表3.1.2-36　　　　喷丸清理和抛丸清理比较

清砂方法		喷丸清理	抛光清理
工艺特点	弹丸流形状	锥形束	扇形束
	喷射效率	较低	较高
	喷射距离	容易调整	一般都不能调整
	喷射指向性	灵活	较差
	操作过程	需要人工掌握喷枪，自由程度较低	不用人工操纵，自由程度较高
设备特点	机械加工件	较少	较多
	易磨损件	较少	较多
	机件（如机棚的橡胶板，平车的转台等）磨损速度	较慢	较快
	生产中维修时间	较短	较快
	动力消耗	大	小

表 3.1.2-37　　　　　　　　　　　　　喷丸方式分类及特点

喷丸类型		特点	应用范围
吸入式	空气 铁丸	弹丸封闭循环，不需要特殊的输送装置，结构简单；但喷射力弱	小件表面清理
重力式	空气	喷射力较吸入式强；结构比较简单手工操作	小件表面清理
压出式	铁丸 空气 空气	压缩空气能量得到充分利用，喷射力最强；喷嘴可以移动	中、大型铸件清理

喷射强化效果主要决定于压缩空气的压力、喷嘴直径和喷射距离。正常喷射时压缩空气的压力根据零件表面硬度、喷丸材料密度和粒度大小来选定。喷嘴直径一般大于弹丸尺寸的4倍。在旋转的工作台上零件的各部位曝喷时间不应少于50 s，以免喷射不足影响强化效果。

喷丸用于强化冷卷弹簧的效果最好，可提高弹簧的疲劳强度50%以上，使用寿命增加几十倍。

6.2 抛丸

用离心式抛丸机以2000 r/min以上的转速将弹丸以60～80 m/s的高速度呈扇形扩散角度抛射在工件表面上，使它的表面层得到强化，称之为抛丸处理。弹丸材料及其应用范围见表3.1.2-38。

弹丸的形状有丸形、块状和柱状，弹丸硬度一般应高于被处理工件HV 150。喷丸和抛丸均使工件的粗糙度增加而机械性能改善。其改善程度与喷射条件、弹丸情况和工件材料有关。经喷丸或抛丸处理后零件表面金属层呈切向流动的塑性变形，由于基体金属的约束产生残余压应力，使零件的疲劳强度提高30%～50%，甚至更高。研究证明：经0.1 mm大小玻璃丸喷丸处理的GH 135（Cr 15 Ni 34 MoVTiAl）合金试样可获得0.1～0.2 mm的硬化层，在300～500℃的温度条件下，其疲劳强度也有明显的增加。

表 3.1.2-38　　弹丸材料及其应用范围

弹丸材料		特　性	适　用　范　围
铸铁	冷硬铸铁可锻铸铁	以冷硬铸铁为主，硬度为HRC 50～57，相对密度 6.8，制造简单，来源充足，易碎，寿命短，价廉，弹丸尺寸 0.5～2 mm	喷丸力不大时广泛应用于各种铸件、锻件和焊接件
钢	铸钢、钢丝头、渗碳钢丝头、淬火钢切屑	铸钢丸寿命最长，硬度为HRC 45～50，相对密度 7.4，钢丝头可利用废料制成，高碳钢的切屑可淬火后利用弹丸尺寸 0.5～2 mm	逐渐代替冷硬铸铁。应用于各种卷弹簧、板簧等。
非铁合金	铅丝头、铜丝头	寿命短、硬度低	用于清理要求高的非铁合金铸件
非金属	玻璃球	寿命短、硬度高、弹丸尺寸 0.1～0.2 mm	用于强化燃汽轮机的叶片、不锈钢弹簧等精密件

抛丸处理可大幅度提高零件的表面硬度，因弹丸、零件的材质和抛射条件不同，抛丸效果有较大差异。当以直径 1 mm钢球抛丸处理时其表面硬度及硬化层深度参见表 3.1.2-39。

表 3.1.2-39　　金属在抛丸前后的硬度与硬化深度

工件材料	抛丸前硬度 (HV)	抛丸后硬度 (HV)	硬度增加率 (%)	硬化层深 (mm)
淬火钢	764	1012	33	0.32
高碳铬钢	667	960	44	0.42
碳　钢	180	303	68	0.40
奥氏体不锈钢	210	497	136	0.62
黄　铜	128	244	90	0.40

6.3　滚压

船舶轴系中间轴、发动机曲轴轴颈等精整加工中有时采用此工艺。

金属零件可以利用滚压方法来改善其精度和表面质量。滚压加工可获得较细的粗糙度，能强化金属零件的表层并保持内部金属纤维的完整，表面硬化层深度可达 0.2～ 5 mm。滚压后表面产生残余压应力可使零件的疲劳强度提高 5％～30%；可改善零件的耐磨性和与其配合件的偶合性及相对运动的条件；滚压过程工作平稳，受力均匀，产生热量少，无热处理缺陷；加工效率高，工具较简单。滚压加工的原理是利用金属在常温下的冷塑性特点，采用专门的滚压工具对零件表面施加一定的压力，使表层金属产生塑性流变，其结果是将零件表面凸起的微观波峰熨平，使其填入凹下的微观波谷内，见图 3.1.2-23 所示。由于金属表层变形使其产生冷作硬化，晶粒变细并沿着变形最大的方向延伸，呈致密的纤维状。金属表层产生很大的残余压应力，且使表层的强度极限增高，塑性降低，硬度增加。因此，零件的工作性能如疲劳、耐磨及耐蚀等都得到改善。

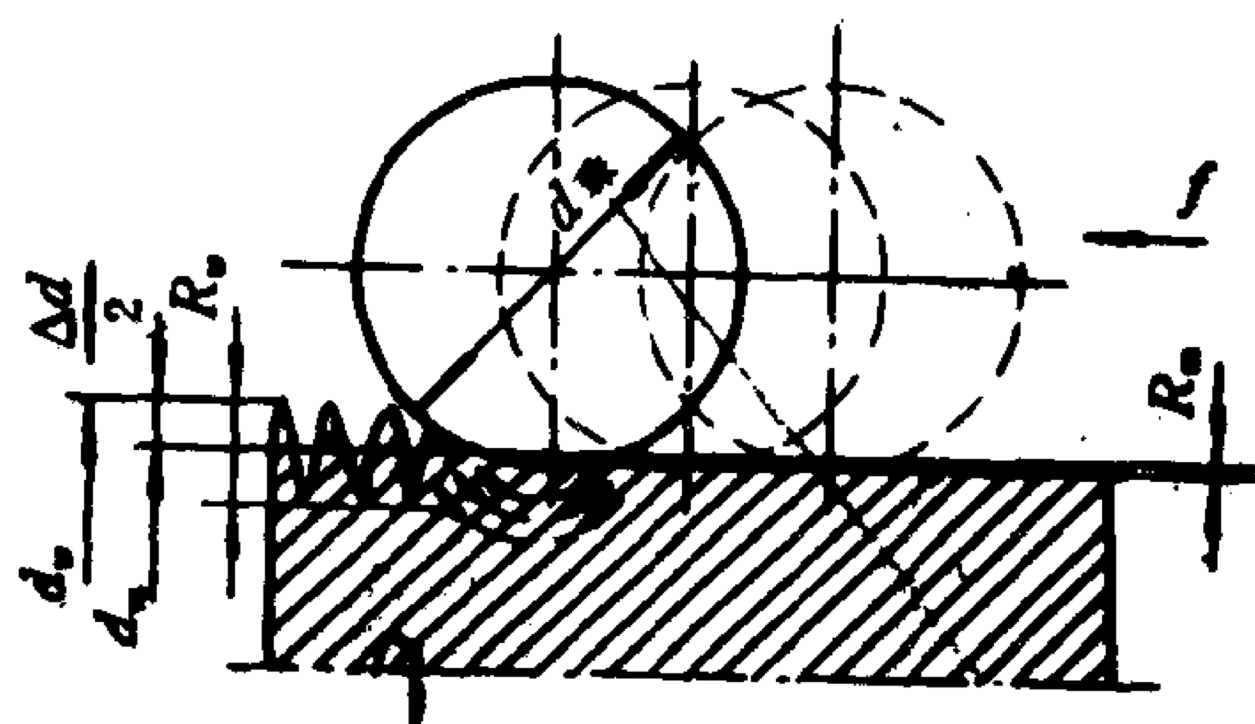


图 3.1.2-23　工件表层金属变形示意图
d_w-滚压前工件直径；d_m-滚压后工件直径；R_w-滚压前微观不平度的高；R_m-滚压后微观不平度的高；f-进给量；d_z-滚珠直径

试验表明：在相同的滚压条件下，不同的金属材料有不同的效果，见表 3.1.2-40 所示。

外圆的滚压加工适用于常温下可以产生塑性变形的金属，对各种钢，铸铁、铝、铜及其合金均可应用。其功用主要是压光、强化，其

次是精整尺寸。外圆滚压加工适于硬度HRC 50以下金属零件。对于高硬度如HRC≥55者须采用人造金刚石和金刚石工具进行挤压加工。

表 3.1.2-40　　不同材料在滚压后的效果

指标 / 材料	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	延伸率 δ (%)	原始状态		滚压后	
				HB	表面粗糙度 R_a (μm)	HB	表面粗糙度 R_a (μm)
纯铜	220	115	50	53	12.5	≥115	0.8
45 钢	610	360	10	197	6.3	>240	0.4
HT 150	150	—	—	180	6.3	>198	1.6

滚压加工工具一般是滚珠式、滚轮式或滚柱式，由碳素工具钢、合金工具钢、高速钢或硬质合金制成，其硬度必须高于被加工件硬度的20%～50%。

孔的滚压加工原理与外圆滚压加工相同，孔的滚压加工可应用于直径为6～500 mm的孔。

7　其它表面强化技术

7.1　激光强化

激光是方向性极好的单色光，能集中成很细的光束，具有很高的能量密度，可用于金属表面的重熔、合金化、焊接、切割和热处理。

用于热加工的激光器分为固体激光器和气体激光器。

1)固体激光器　即钇铝石榴石（红宝石）激光器；是利用氙灯对红宝石单晶辐照，使之激发产生激光。此种激光器电光转换效率很低，仅为1/100，连续输出功率约为1 kW。

2)气体激光器　有中性原子激光（He—Ne）；离子激光（Ar）和分子激光（CO_2）。CO_2激光转换效率较高，可达15%～20%，目前已有10 kW级商品在国际市场上供应。

CO_2激光器有直流纵向放电；横向流动等形式。直流纵向放电激光器的结构和原理如图3.1.2-24所示。气流在管中呈环形流动，经热交换器进行循环冷却。当正负极之间加以电压时，则气体分子产生放电、激发、共振，气体分子的激发形成能阶变化，生成10.6 μm波长的激光束，经偏转，聚焦使其具有高密度的功率。

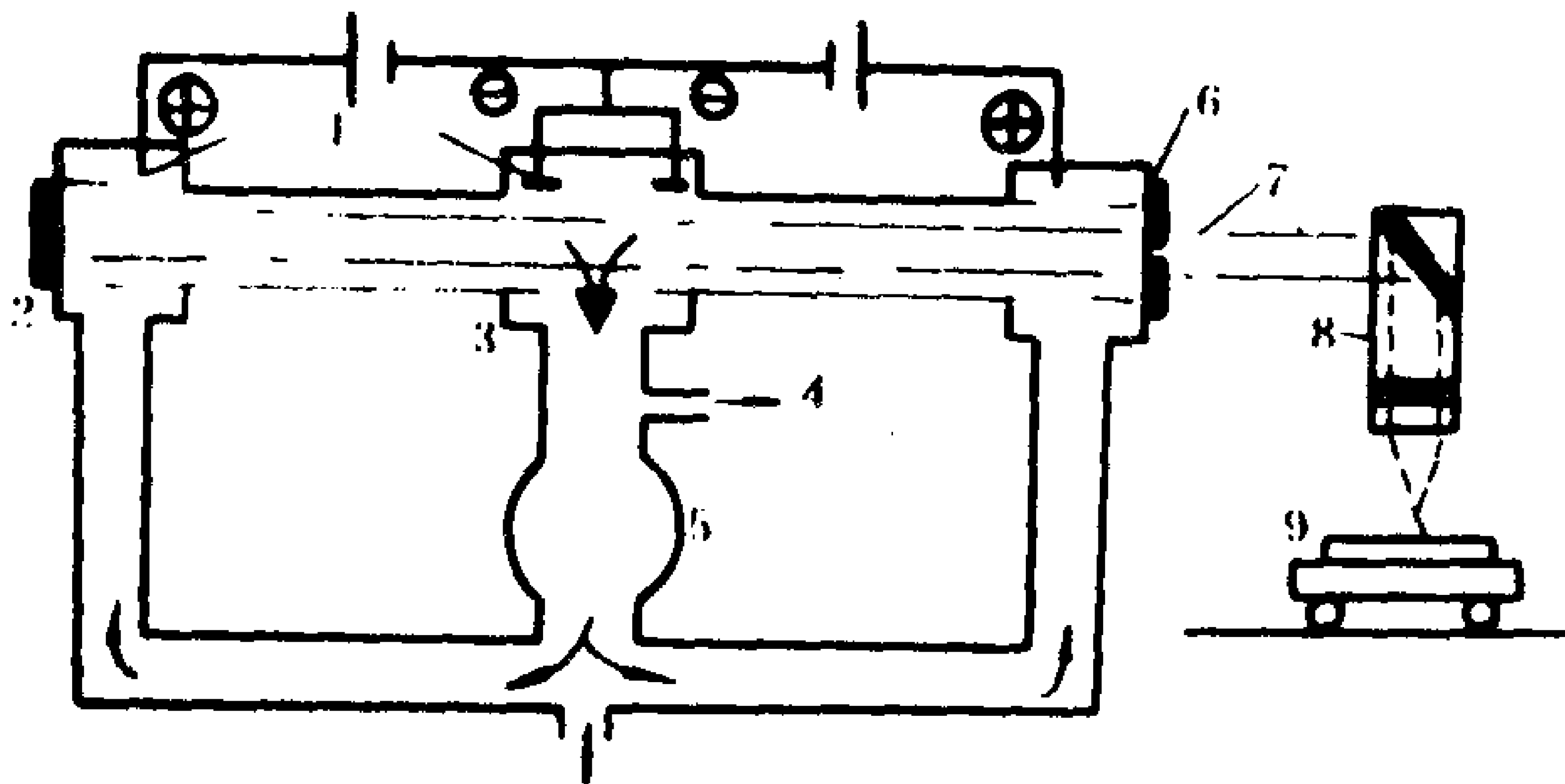


图 3.1.2-24　同轴式CO_2激光器的原理图

1-电极；2-全反射膜；3-热交换器；4-真空泵；5-风扇；6-半反射膜；7-激光束；8-激光枪；9-载料车

激光热处理的特点为：

(1)加热、冷却迅速，随功率密度的增加，加热速度可达10^5～10^9℃/s，相应的加热时间则为10^{-3}～10^{-7}s。当硬化层深度在0.5 mm以内时，淬硬时间为0.3 s，靠金属自身冷却，冷却速度可达10^4K/s，不需淬火介质。

(2)硬度高、硬化层浅、变形小可以忽略不计。获得的淬火组织比常规淬火马氏体细小。

(3)残余压应力高，可达4 GPa

能显著提高疲劳强度、耐磨性和耐蚀性。

（4）适用于形状复杂零件的局部强化，可用于任何牌号的钢和铸铁材料。

（5）不要求真空环境，但零件表面须加涂层以吸收激光而不反射。常用发蓝、磷化或涂碳素墨汁来黑化。

（6）总的转换效率低，设备费用高，测温困难。

（7）激光加热的搭接区因回火而硬度下降，一般激光加热带应为螺旋线，或不搭接往复平行线。

激光加热还可应用于金属的非晶化、合金化、有色金属及合金的强化、激光上釉（使金属表面改性、上光等）。

7.2 离子注入

将金属或非金属元素离子化，然后将其注入材料的表面薄层约 1 μm深度，从而改变材料性质的方法称为离子注入。60 年代离子注入首先是用于半导体的掺杂，现已发展为精密的金属表面处理工艺，能使金属表面具有耐磨、耐蚀性能，可使钢和碳化钨类材料等提高寿命 3 ～ 5 倍。本技术可控度高，可与通常的处理方法相竞争。离子注入装置如图 3.1.2-25 所示。

离子注入是将高能离子束打入基体金属表面 1 μm深处形成高度过饱和固溶体、亚稳定相、非晶态组织或平衡合金等不同结构。除改变材料表面性能外，可用于研究合金化的微观机理。

金属离子注入过程　是将高能的金属离子束打入母材表面。金属被电离后自离子源引出，经电压差 10～500 kV加速后，再使离子束通过横向磁场，选出特定能量和质量的离子，经扫描注入靶（母材）表面。系统是在高真空 1.33×10^{-7}Pa条件下进行，以保证离子束在规定路线上前进时不与其它物质发生碰撞。高速的离子到达金属表面时穿透表层与内部原子发生撞击，电子激发和离子化过程中失去了原有能量，最后静止在母材内部。同时产生了大量置换原子、间隙原子和空位。在室温及注入所产生的热效应作用下，使一部分间隙原子和空位复合，另一部分间隙原子和空位分别集聚而形成位错。因此，离子注入的表面层形成稠密的位错网络。由于外部原子的渗入和离子轰击所产生的大量辐照损伤，表面区产生膨胀倾向，膨胀受到基体限制，从而形成压应力区。离子注入也可看成原子尺寸的喷丸处理。

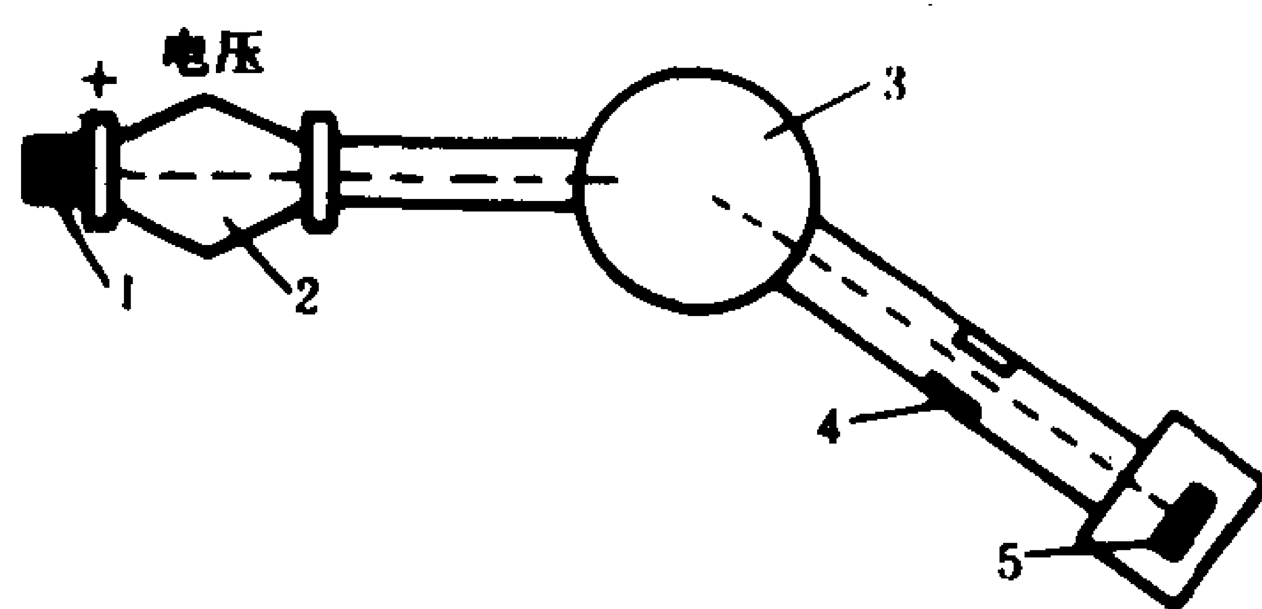


图 3.1.2-25　离子注入装置示意图
1-离子源；2-离子加速；3-磁质量分析；
4-离子束扫描极板；5-靶（工件）

用于提高金属表面机械性能的注入元素为氮、碳、硼、钼、硫等。用于改善耐蚀性能的注入元素为氮、氖、铈、钛、铝、铬、镍、铜等。

轻质量非金属原子如氮、磷、硼、碳等注入过程与上述相同。离子能量越高、质量越小、离子注入的射程越大。实际上此射程很短，如 100 eV的氮离子注入到钢中的原始深度也只有 0.1 μm左右。由于注入的热效应产生温升，促进注入离子的扩散内移，当 150°C时可

达到 0.5 μm处。为避免温度大于 250℃时氮原子重新分布，注入温度不超过 200℃。

离子注入的特点如下：

（1）离子注入层形成符合状态图的组织，与基体无明显分界面，不存在疏松，剥落和界面腐蚀等。

（2）可得到常规冶金所不能获得的合金，可自由组合母材与注入元素。

（3）温度低，无变形，不提高母材粗糙度，可进行局部处理。

（4）注入层浅，仅为 1 μm，但可控性高。

（5）在高真室下操作，费用高，工业化困难。

7.3　电子束热处理

电子束加热的机制与激光不同，它是通过阴极发射的电子流被高压加速和磁性聚焦后的一束高速电子流扫描零件表面，高速的电子动能转化为热能，使金属表面加热。电子束的瞬间穿透深度大于激光，如在 125 kV的加速电压下其透入母材金属的深度为 0.04 mm，而激光的能量传递靠金属表面黑化涂层对激光的吸收，其透入母材金属的深度仅为几个原子层厚度。目前国内大功率的激光发生器还很少生产，而电子束发生器则有 30～60 kW的电子枪供应，所以，对电子束加热应予重视。电子束也可以用于高质量的焊接、切割和热喷涂的合金涂层的重熔等。

电子束加热的特点：

（1）电子束斑很小，有非常高的功率密度。可使被轰击的表面迅速熔化或达到奥氏体化温度，而不影响其它部分，靠母材自身冷却淬火，冷却速度可达 10000℃/s，变形小。

（2）电热转换效率高，一般为 90%，而激光仅为 10%～15%。电子束加热无须黑化处理。

（3）适应淬硬层深度为 0.2～2.5 mm的表面强化或局部淬火

（4）要求在真空室内进行处理，消耗于真空室的能量大。

7.4　物理气相沉积

物理气相沉积（PVD）也称为离子镀或干镀。它与湿式电镀、化学镀或等离子喷涂等相比较有许多优点：

（1）镀层材质的成分非常广泛。金属、合金、金属间化合物、陶瓷、玻璃以及有机材料均可镀覆。

（2）工件的温度可以由低温至高温任意改变，可控制镀膜的结构。

（3）能得到高纯度的镀膜，附着性优良。

（4）镀膜表面粗糙度与精加工相当，镀后勿须加工。

（5）无公害。

物理气相沉积主要的方法有 3 种，分别简介如下：

（1）真空蒸镀　在真空容器内使镀膜材料在 1.33×（10^{-3}～10^{-4}）Pa的压力下被加热蒸发。蒸发的原子或分子从蒸发源到蒸镀工件上象光线一样直射，途中不与其它原子或分子碰撞而到达工件上，这就是蒸镀的简单原理。

如图 3.1.2-26 所示，为用电子束蒸发源的真空蒸镀的例子。蒸发源可用电阻加热。

（2）离子镀　此方法蒸发粒子和蒸镀情况与真空蒸镀相同，是以蒸发源被加热蒸发的粒

子奔向工件的。与蒸镀不同点是：蒸发粒子在前进过程中，通过真空容器中残留气体的辉光放电，其中一部分粒子要离子化。为产生辉光放电须向工件附加 1 ～ 5 kV的负偏压，且要向容器内通入氩气，气压为 1.33×（5 ×10^{-1}～ 2 ×10）Pa。工件为阴极，当辉光产生时受到高能量气体离子轰击而溅射，使表面受到清洗，因此，镀膜附着性好。当然，被镀覆的镀膜本身也要被溅射使沉积的速度有所减弱。如图 3.1.2-27 所示。

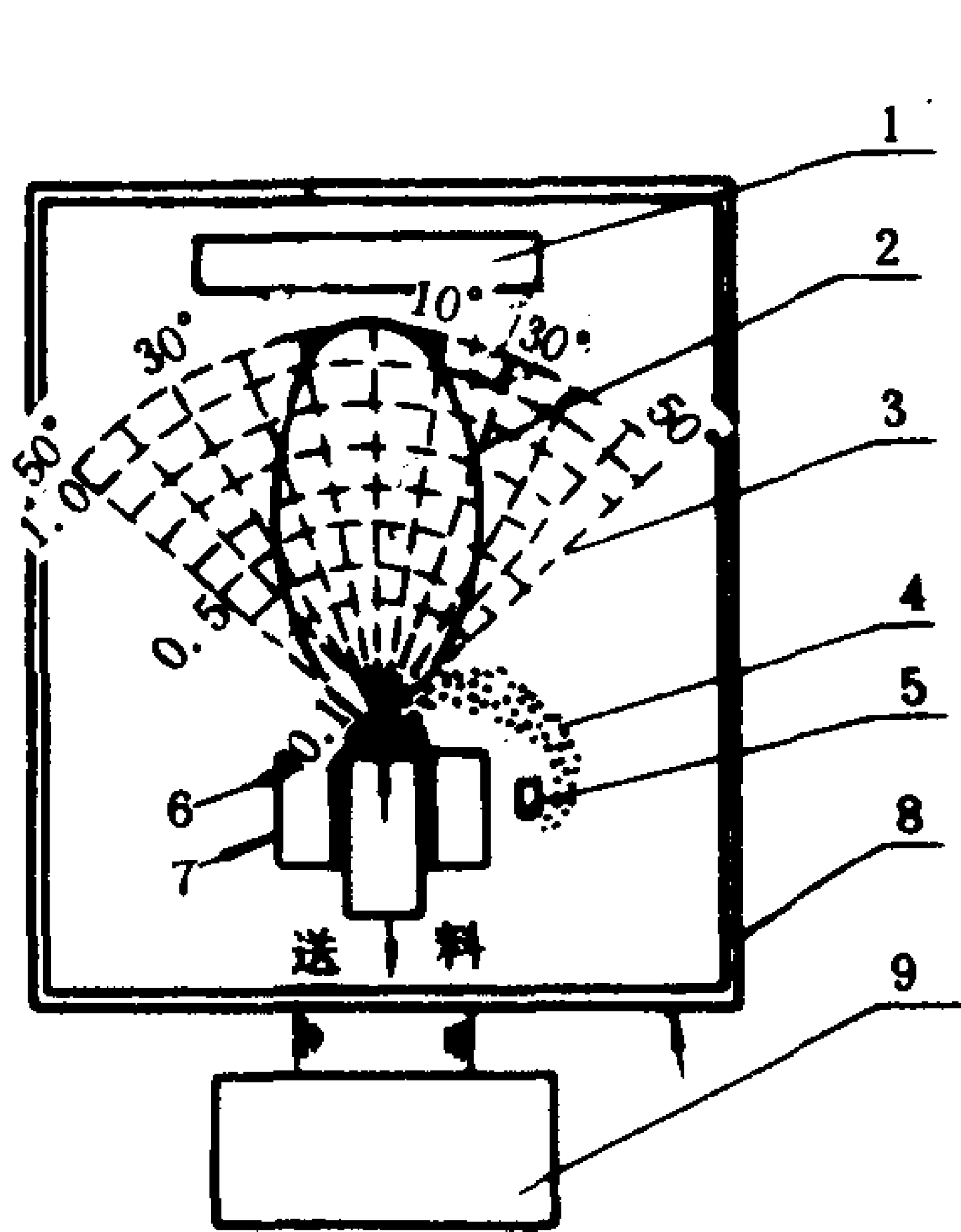


图 3.1.2-26 装有电子束蒸发源的蒸发装置表示电子束的蒸发分布情况

1 -工件；2 -磁力线；3 -剖面线；4 -电子束；5 -电子枪；6 -熔融面；7 -水冷熔槽；8 -真空槽；9 -抽气系统

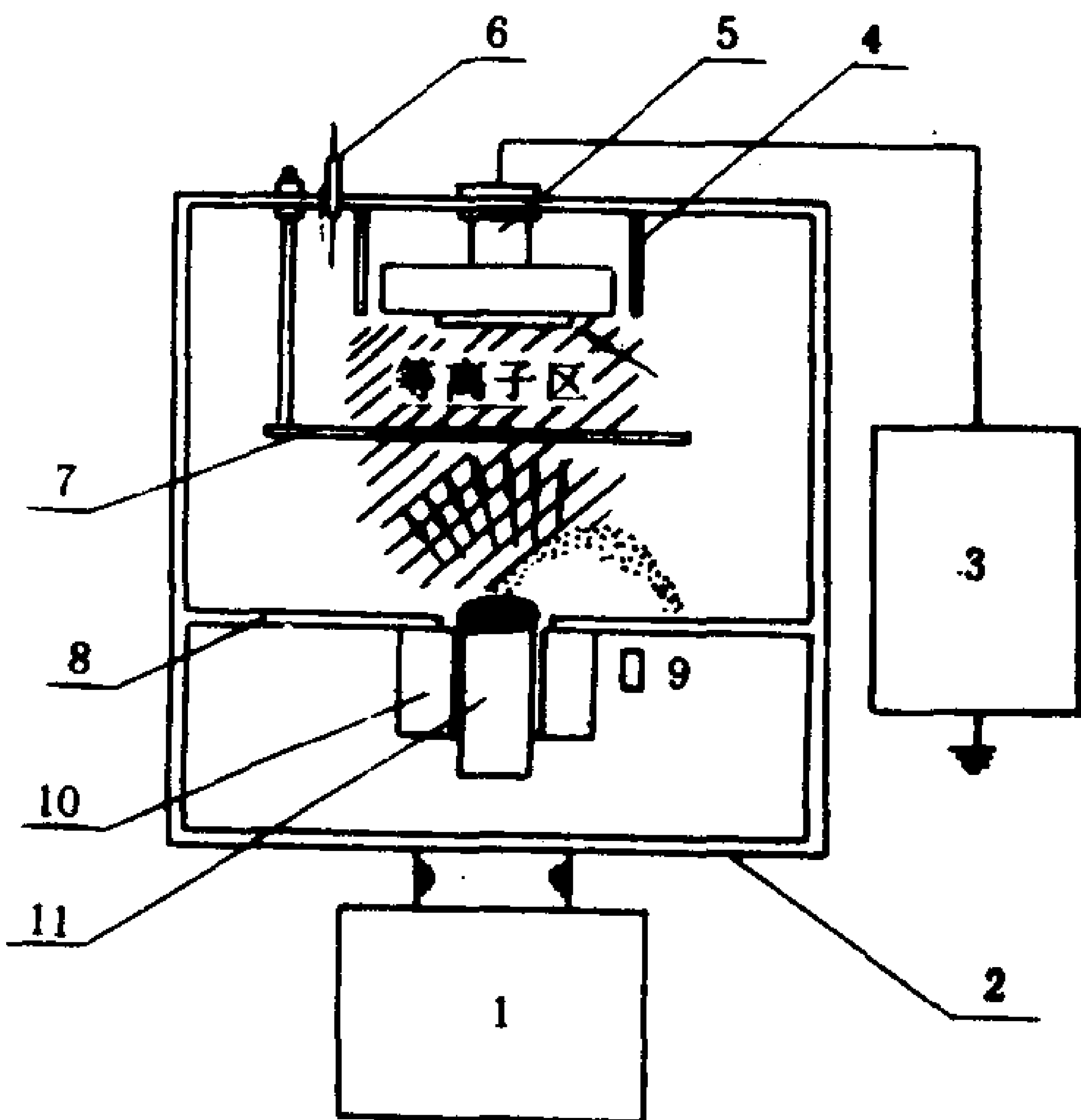


图 3.1.2-27 离子镀渗装置的示意图

1 -真空泵；2 -真空室；3 -电源；4 -保护板；5 -工件夹具；6 -通入气体；7 -百叶窗；8 -差压板；9 -电子枪；10-水冷坩埚；11-被蒸发气体

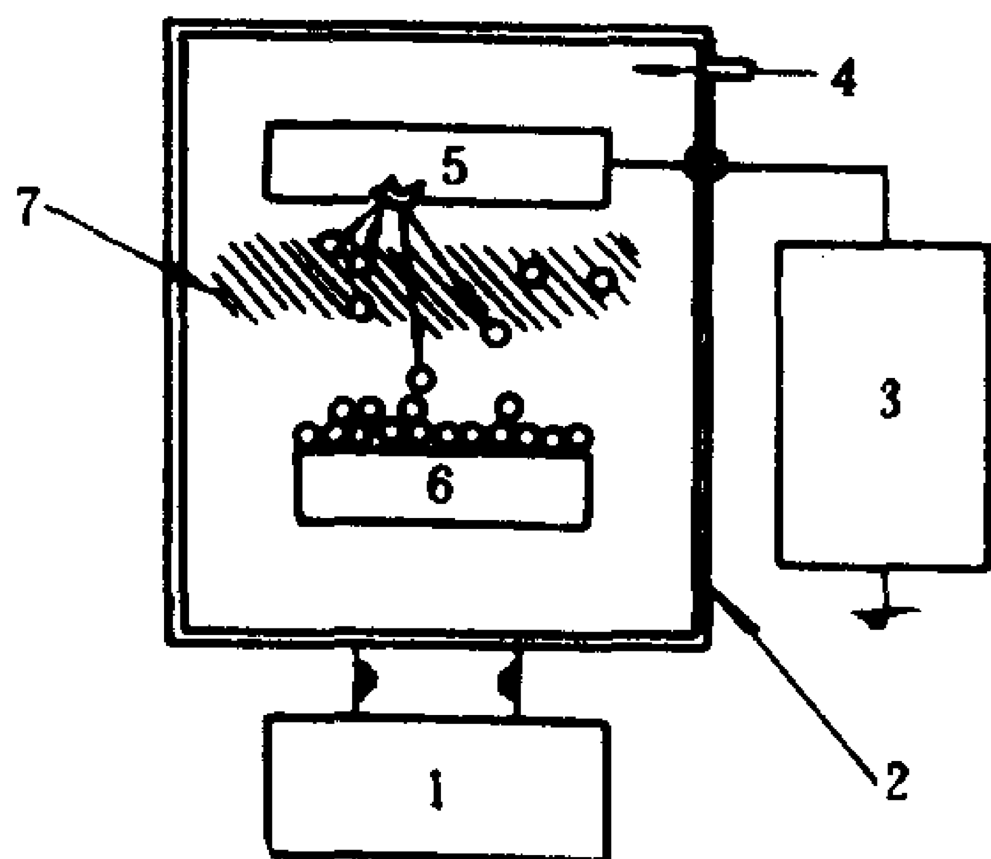


图 3.1.2-28 溅射的基本型示意图

1 -抽气系统；2 -真空室；3 -电源；4 -气体入口；5 -靶；6 -工件；7 -等离子体

（3）溅射 前述两种方法镀层物质由蒸发源被加热熔化后在真空中蒸发并沉积在工件表面上。而溅射不用加热蒸发源，如图 3.1.2-28 所示。图中的靶是用镀膜物质制成的板极，真空容器内通入压力为 1.33×（2 ～10）Pa的氩气，给靶（阴极）加上数百至数千伏负压，产生辉光放电并生成氩离子。氩离子轰击靶，将靶材料的原子打出，则这些原子便沉积在工件上，形成镀膜。在此情况下，靶和工件位置间的几何学相互关系对镀膜的均匀性和绕镀性（工件背面与靶相距远，沉积物质须绕过与靶相对的表面）有影响。离子镀的应用举例见表 3.1.2-41。

表 3.1.2-41 离子镀应用举例

应用	镀膜	镀膜与工件的材质	用 途
耐蚀	Al、Zn、Cd	Zn、Al/高强度钢	船舶
		Al/软钢螺栓类	一般结构用材料

应用	镀膜	镀膜与工件的材质	用　途
耐热	Al、W、Ti、Ta	Al/钢、不锈钢	一般结构用材料排气管、耐火材料
装饰	Au、Ag	Au/不锈钢，Ag/黄铜	工艺装饰品，仪表等
	TiC、TiN	TiCTiN/不锈钢	装饰品，仿金及硬化
	Al	Al/黄铜、软钢板	着色涂层、防护
	玻璃	玻璃/塑料	玻璃镀膜塑料镜
表面硬化	Cr、CrN，CrC	Cr/型钢、软钢　N化物/不锈钢、轴承钢铸铁	机械零件
	TiN，TaN	TiN/不锈钢、高速钢、硬质合金	机械零件、超硬工具
塑料	Ni、Cu、Cr	Ni、Cu、Cr/树脂	电器零件、装饰品
电子工业	Au，Al、Cu、Ni	Au、Al、Ni/Si薄膜	导电膜　电极副
	W、Pt	W/铜合金	触点材料
	Cu	Cu/陶瓷、树脂	印刷电路、薄膜集成电路
光学	SiO_2、TiO_2	氧化物/玻璃	无反射耐磨涂层玻璃

7.5　化学气相沉积

利用气态物质在一固体表面上进行化学反应，生成固态沉淀物的过程称为化学气相沉积(CVD)。

现代科学需要使用大量功能各异的无机新材料，这些功能材料必须是高纯的，或者是在高纯材料中人为地掺入某些杂质形成的掺杂材料。但是，人们过去所熟悉的许多制备方法，如冶炼、电解、溶液沉淀和结晶等不能保证得到高纯度的产品。化学气相沉积是近20年来发展起来的制备各种无机材料的新技术。此技术已应用于提纯物质、研制新晶体，生产各种单晶、多晶或玻璃态无机薄膜材料和各种功能的镀膜。它们可以是氧化物、硫化物、碳化物也可以是二元或多元间化合物，而且其物理功能可通过化学气相沉积过程得到精确地控制。

几乎所有无机多晶材料都可以用化学气相沉积制备，特别是在金属、合金或其它材料表面上沉积一层耐磨、耐蚀、热稳定性高、抗辐射的多晶保护层时，更适于采用。

三种化学气相沉积法简介如下：

(1)化学喷雾沉积　它是将物质溶解在适当溶剂中，用喷雾器使溶液成微小雾滴，送至离加热基体几毫米以内的地方，反应物气化并在固体表面上发生反应形成沉积层。

(2)反应蒸发　在低真空下，用电阻或电子枪使金属原子蒸发，进而与反应气体在热基体表面上反应，生成化合物沉积层。此法适于低温沉积并用于TiO_2，Al_2O_3、AlN、TiC等镀膜的制备。

(3)活化反应蒸发　实质上是在真空条件下等离子体活化的反应蒸发过程。用微波、射频或放电的方法都可以产生等离子体。金属原子和反应气体在反应区内都被等离体活化，生成化合物沉积层。此方法用于在较低温度下沉积金属碳化物、氮化物和氧化物。因此，离子镀的过程包括物理与化学气相沉积。

各种镀膜的比较见表3.1.2-42。

表 3.1.2-42　　　　**各种镀膜的比较**

镀膜物质及其它指标	真空蒸镀		溅射	离子镀	
	电阻加热	电子束	离子轰击	电阻加热	电子束
低熔点金属	可以		可以	可以	可以
高熔点金属	不可以	可以	可以	不可以	可以
高温化合物	不可以	可以	可以	不可以	可以
沉积速度（μm/min）	0.1～3	1～75	0.01～0.5	0.1～0.2	1～5
密度	较低		高	高	高
外观	光泽		半光泽-消失	半光泽	消失
致密性	较好		相当好	非常好	
真空度（Pa）	1.33×10^{-3}～1.33×10^{-4}		2.66～13.3	0.667～26.6	0.667

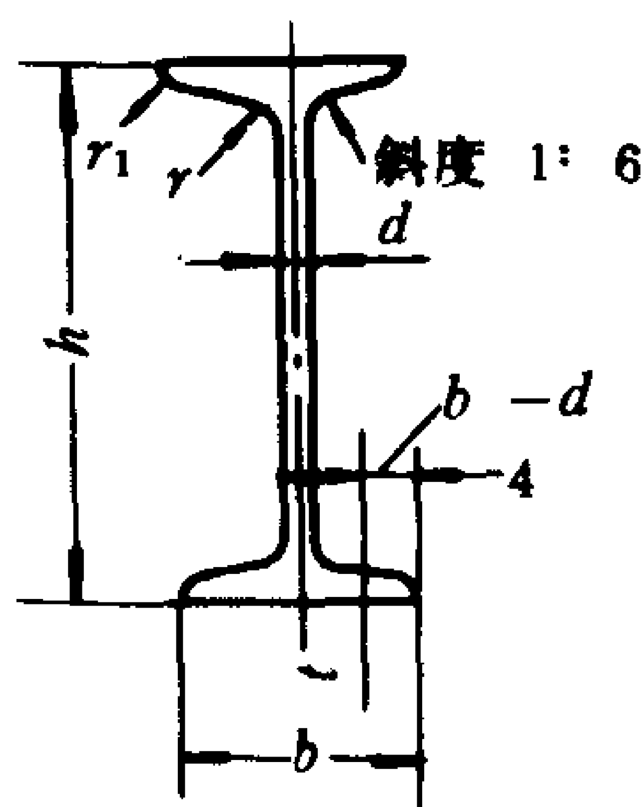
第 3 章　轮机常用钢材型号与规格

1　型钢

1.1　热轧普通工字钢

热轧普通工字钢型号与规格见表 3.1.3-1。

表 3.1.3-1　　　　**热轧普通工字钢**（摘自 GB706—65）



h—高度；*b*—腿宽；*d*—腰厚；*t*—平均腿厚；
r—内圆弧半径；r_1—腿端圆弧半径

型　　号	尺　　寸 (mm)						截面面积 (cm²)	理论质量 (kg/m)
	h	*b*	*d*	*t*	*r*	r_1		
10	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3	14.3	11.2
12.6	126	74	5	8.4	7	3.5	18.1	14.2
14	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8	21.5	16.9
16	160	88	6.0	9.9	8.0	4.0	26.1	20.5
18	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3	30.6	24.1
20 a	200	100	7.0	11.4	9.0	4.5	35.5	27.9
20 b	200	102	9.0	11.4	9.0	4.5	39.5	31.1
22 a	220	110	7.5	12.3	9.5	4.8	42.0	33.0
22 b	220	112	9.5	12.3	9.5	4.8	46.4	36.4
25 a	250	116	8	13	10	5	48.5	38.1
25 b	250	118	10	13	10	5	53.5	42.0
28 a	280	122	8.5	13.7	10.5	5.3	55.45	43.4
28 b	280	124	10.5	13.7	10.5	5.3	61.05	47.9
32 a	320	130	9.5	15	11.5	5.8	67.05	52.7
32 b	320	132	11.5	15	11.5	5.8	73.45	57.7
32 c	320	134	13.5	15	11.5	5.8	79.95	62.8
36 a	360	136	10.0	15.8	12.0	6.0	76.3	59.9
36 b	360	138	12.0	15.8	12.0	6.0	83.5	65.6
36 c	360	140	14.0	15.8	12.0	6.0	90.7	71.2
40 a	400	142	10.5	16.5	12.5	6.3	86.1	67.6
40 b	400	144	12.5	16.5	12.5	6.3	94.1	73.8
40 c	400	146	14.5	16.5	12.5	6.3	102	80.1
45 a	450	150	11.5	18.0	13.5	6.8	102	80.4
45 b	450	152	13.5	18.0	13.5	6.8	111	87.4

续上表

型号	尺寸 (mm)						截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)
	h	b	d	t	r	r_1		
45 c	450	154	15.5	18.0	13.5	6.8	120	94.5
50 a	500	158	12.0	20.0	14.0	7.0	119	93.6
50 b	500	160	14.0	20.0	14.0	7.0	129	101
50 c	500	162	16.0	20.0	14.0	7.0	139	109
56 a	560	166	12.5	21	14.5	7.3	135.25	106.2
56 b	560	168	14.5	21	14.5	7.3	146.45	115.0
56 c	560	170	16.5	21	14.5	7.3	157.85	123.9
63 a	630	176	13.0	22	15	7.5	154.9	121.6
63 b	630	178	15.0	22	15	7.5	167.5	131.5
63 c	630	180	17.0	22	15	7.5	180.1	141.0

注：①工字钢通常长度：8～18 号工字钢长 5～19 m；20～63 号工字钢长 6～19 m。

②制造钢号：A3, A3F, B3F。

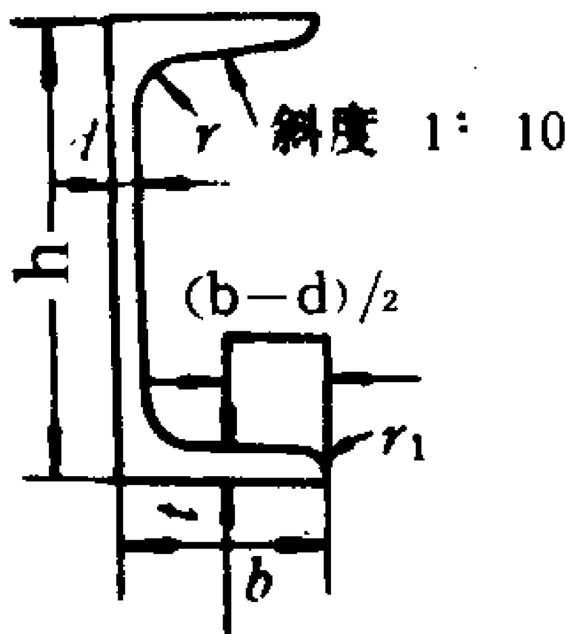
③标记举例：普通碳素钢甲类平炉 3 号沸腾钢 400×144×12.5 mm 的热轧普通工字钢的标记为：

热轧普通工字钢 $\frac{400\times144\times12.5\text{—GB 706—65}}{\text{A 3 F—YB 170—63}}$。

1.2 热轧普通槽钢

热轧普通槽钢型号与规格见表 3.1.3-2。

表 3.1.3-2　　热轧普通槽钢（摘自 GB 707—65）



h—高度；b—腿宽；d—腰厚；t—平均腿厚；
r—内圆弧半径；r_1—腿端圆弧半径

型号	尺寸，(mm)						截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)
	h	b	d	t	r	r_1		
5	50	37	4.5	7.0	7.0	3.50	6.93	5.44
6.3	63	40	4.8	7.5	7.5	3.75	8.444	6.63
8	80	43	5.0	8.0	8.0	4.0	10.24	8.04
10	100	48	5.3	8.5	8.5	4.25	12.74	10.00
12.6	126	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.69	12.37
14 a	140	58	6.0	9.5	9.5	4.75	18.51	14.53
14 b	140	60	8.0	9.5	9.5	4.75	21.31	16.73
16 a	160	63	6.5	10.0	10.0	5.0	21.95	17.23

型　号	尺　寸, (mm)						截面面积 (cm²)	理论质量 (kg/m)
	h	b	d	t	r	r_1		
16	160	65	8.5	10.0	10.0	5.0	25.15	19.74
18 a	180	68	7.0	10.5	10.5	5.25	25.69	20.17
18	180	70	9.0	10.5	10.5	5.25	29.29	22.99
20 a	200	73	7.0	11.0	11.0	5.5	28.83	22.63
20	200	75	9.0	11.0	11.0	5.5	32.83	25.77
22 a	220	77	7.0	11.5	11.5	5.75	31.84	24.99
22	220	79	9.0	11.5	11.5	5.75	36.24	28.45
25 a	250	78	7	12	12	6	34.91	27.47
25 b	250	80	9	12	12	6	39.91	31.39
25 c	250	82	11	12	12	6	44.91	35.32
28 a	280	82	7.5	12.5	12.5	6.25	40.02	31.42
28 b	280	84	9.5	12.5	12.5	6.25	45.62	35.81
28 c	280	86	11.5	12.5	12.5	6.25	51.22	40.21
32 a	320	88	8	14	14	7	48.7	38.22
32 b	320	90	10	14	14	7	55.1	43.25
32 c	320	92	12	14	14	7	61.5	48.28
36 a	360	96	9.0	16.0	16.0	8.0	60.89	47.80
36 b	360	98	11.0	16.0	16.0	8.0	68.09	53.45
36 c	360	100	13.0	16.0	16.0	8.0	75.29	59.10
40 a	400	100	10.5	18.0	18.0	9.0	75.05	58.91
40 b	400	102	12.5	18.0	18.0	9.0	83.05	65.19
40 c	400	104	14.5	18.0	18.0	9.0	91.05	71.47

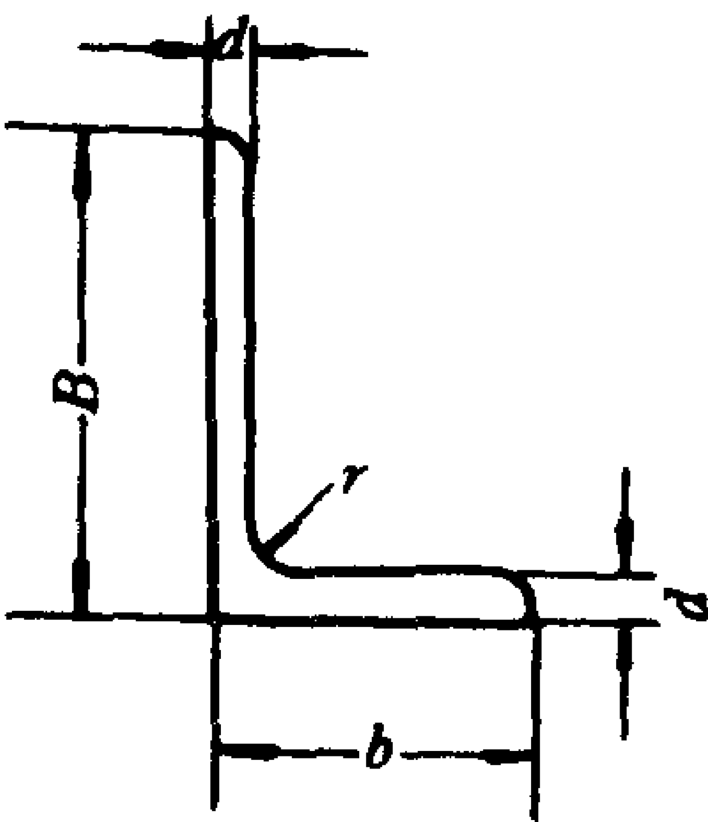
注：①普通槽钢通常长度：5～8号长5～12 m；10～18号长5～19 m；20～40号长6～19 m。
②制造钢号：A 3、A 3 F、B 3 F 等。
③标记举例：普通碳素钢甲类平炉3号沸腾钢180×68×7 mm的热轧普通槽钢的标记为：

热轧普通槽钢$\frac{180\times68\times7\text{—GB 707—65}}{\text{A 3 F—YB 170—63}}$。

1.3 热轧等边角钢

热轧等边角钢号数与规格见表3.1.3-3。

表3.1.3-3　　热轧等边角钢（摘自YB166—65）



b—边宽；d—边厚；r—内圆弧半径

角钢号数	尺寸 (mm)			截面面积 (cm²)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m²/m)
	b	d	r			
2	20	3	3.5	1.132	0.889	0.078
		4		1.459	1.145	0.077

续上表

角钢号数	尺寸 (mm)			截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m^2/m)
	b	d	r			
2.5	25	3	3.5	1.432	1.124	0.098
		4		1.859	1.459	0.097
3.0	30	3	4.5	1.749	1.373	0.117
		4		2.276	1.786	0.117
3.6	36	3		2.109	1.656	0.141
		4		2.756	2.163	0.141
		5		3.382	2.654	0.141
4	40	3	5	2.359	1.852	0.157
		4		3.086	2.422	0.157
		5		3.791	2.976	0.156
4.5	45	3	5	2.659	2.088	0.177
		4		3.486	2.736	0.177
		5		4.292	3.369	0.176
		6		5.076	3.985	0.176
5	50	3	5.5	2.971	2.332	0.197
		4		3.897	3.059	0.197
		5		4.803	3.770	0.196
		6		5.688	4.465	0.196
5.6	56	3	6	3.343	2.624	0.221
		4		4.390	3.446	0.220
		5		5.415	4.251	0.220
		8		8.367	6.568	0.219
6.3	63	4	7	4.978	3.907	0.248
		5		6.143	4.822	0.248
		6		7.288	5.721	0.247
		8		9.515	7.469	0.247
		10		11.657	9.151	0.246
7	70	4	8	5.570	4.372	0.275
		5		6.875	5.397	0.275
		6		8.160	6.406	0.275
		7		9.424	7.398	0.275
		8		10.667	8.373	0.274
(7.5)	75	5	9	7.367	5.818	0.295
		6		8.797	6.905	0.294
		7		10.160	7.976	0.294
		8		11.503	9.030	0.294
		10		14.126	11.089	0.293

续上表

角钢号数	尺寸 (mm)			截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m^2/m)
	b	*d*	*r*			
8	80	5	9	7.912	6.211	0.315
		6		9.397	7.376	0.314
		7		10.860	8.525	0.314
		8		12.303	9.658	0.314
		10		15.126	11.874	0.313
9	90	6	10	10.637	8.350	0.354
		7		12.301	9.656	0.354
		8		13.944	10.946	0.353
		10		17.167	13.476	0.353
		12		20.306	15.940	0.352
10	100	6	12	11.932	9.366	0.393
		7		13.796	10.830	0.393
		8		15.638	12.276	0.393
		10		19.261	15.120	0.392
		12		22.800	17.898	0.391
		14		26.256	20.611	0.391
		16		29.627	23.257	0.390
11	110	7	12	15.196	11.928	0.433
		8		17.238	13.532	0.433
		10		21.261	16.690	0.432
		12		25.200	19.782	0.431
		14		29.056	22.809	0.431
12.5	125	8	14	19.750	15.504	0.492
		10		24.373	19.133	0.491
		12		28.912	22.696	0.491
		14		33.367	26.193	0.490
14	140	10		27.373	21.488	0.551
		12		32.512	25.522	0.551
		14		37.567	29.490	0.550
		16		42.539	33.393	0.549
16	160	10	16	31.502	24.729	0.630
		12		37.441	29.391	0.630
		14		43.296	33.987	0.629
		16		49.067	38.518	0.629
18	180	12		42.241	33.159	0.710
		14		48.896	38.383	0.709
		16		55.467	43.542	0.709
		18		61.955	48.634	0.708

续上表

角钢号数	尺寸 (mm)			截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m^2/m)
	b	*d*	*r*			
20	200	14	18	54.642	42.894	0.788
		16		62.013	48.680	0.788
		18		69.301	54.401	0.787
		20		76.505	60.056	0.787
		24		90.661	71.168	0.785

注：①等边角钢的通常长度：2～4号长3～9 m；4.5～8号长4～12 m；9～14号长4～19 m；16～20号长6～19 m。

②制造钢号：A 3、A 3 F、B 3 F。

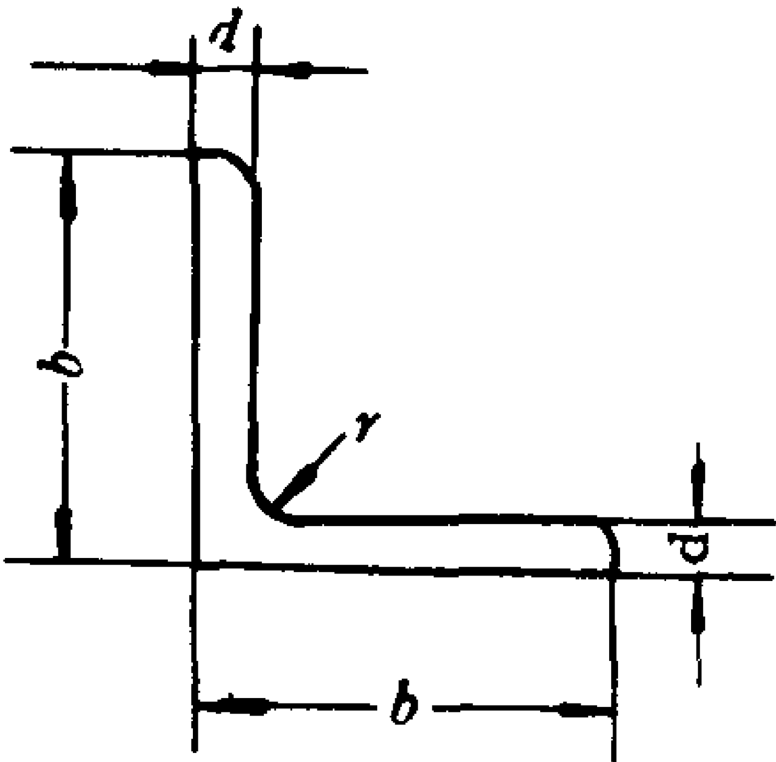
③标记举例：普通碳素钢甲类平炉3号沸腾钢160×160×16 mm的热轧等边角钢的标记为：

热轧等边角钢 $\frac{160\times160\times16—YB\ 166—65}{A\ 3\ F—YB\ 170—63}$。

1.4 热轧不等边角钢

热轧不等边角钢号数与规格如表3.1.3-4。

表3.1.3-4　　**热轧不等边角钢**　（摘自 YB 167—65）



B—长边宽度；*b*—短边宽度；*d*—边厚；*r*—内圆弧半径

角钢号数	尺寸 (mm)				截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m^2/m)
	B	*b*	*d*	*r*			
2.5/1.6	25	16	3	3.5	1.162	0.912	0.080
			4		1.499	1.176	0.079
3.2/2	32	20	3		1.492	1.171	0.102
			4		1.939	1.522	0.101
4/2.5	40	25	3	4	1.890	1.484	0.127
			4		2.467	1.936	0.127
4.5/2.8	45	28	3	5	2.149	1.687	0.143
			4		2.806	2.203	0.143
5/3.2	50	32	3	5.5	2.431	1.908	0.161
			4		3.177	2.494	0.160

续上表

角钢号数	尺寸 (mm)				截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m^2/m)
	B	*b*	*d*	*r*			
5.6/3.6	56	36	3	6	2.743	2.153	0.181
			4		3.590	2.818	0.180
			5		4.415	3.466	0.180
6.3/4	63	40	4	7	4.058	3.185	0.202
			5		4.993	3.920	0.202
			6		5.908	4.638	0.201
			7		6.802	5.339	0.201
7/4.5	70	45	4	7.5	4.547	3.570	0.226
			5		5.609	4.403	0.225
			6		6.647	5.218	0.225
			7		7.657	6.011	0.225
(7.5/5)	75	50	5	8	6.125	4.808	0.245
			6		7.260	5.699	0.245
			8		9.467	7.431	0.244
			10		11.590	9.098	0.244
8/5	80	50	5		6.375	5.005	0.255
			6		7.560	5.935	0.255
			7		8.724	6.848	0.255
			8		9.867	7.745	0.254
9/5.6	90	56	5	9	7.212	5.661	0.287
			6		8.557	6.717	0.286
			7		9.880	7.756	0.286
			8		11.183	8.779	0.286
10/6.3	100	63	6	10	9.617	7.550	0.320
			7		11.111	8.722	0.320
			8		12.584	9.878	0.319
			10		15.467	12.142	0.319
10/8	100	80	6	10	10.637	8.350	0.354
			7		12.301	9.656	0.354
			8		13.944	10.946	0.353
			10		17.167	13.476	0.353
11/7	110	70	6		10.637	8.350	0.354
			7		12.301	9.656	0.354
			8		13.944	10.946	0.353
			10		17.167	13.476	0.353

续上表

角钢号数	尺寸 (mm)				截面面积 (cm²)	理论质量 (kg/m)	外表面积 (m²/m)
	B	*b*	*d*	*r*			
12.5/8	125	80	7	11	14.096	11.066	0.403
			8		15.989	12.551	0.403
			10		19.712	15.474	0.402
			12		23.351	18.330	0.402
14/9	140	90	8	12	18.038	14.160	0.453
			10		22.261	17.475	0.452
			12		26.400	20.724	0.451
			14		30.456	23.908	0.451
16/10	160	100	10	13	25.315	19.872	0.512
			12		30.054	23.592	0.511
			14		34.709	27.247	0.510
			16		39.281	30.835	0.510
18/11	180	110	10	14	28.373	22.273	0.571
			12		33.712	26.464	0.571
			14		38.967	30.589	0.570
			16		44.139	34.649	0.569
20/12.5	200	125	12		37.912	29.761	0.641
			14		43.867	34.436	0.640
			16		49.739	39.045	0.639
			18		55.526	43.588	0.639

注：①不等边角钢通常长度：2.5/1.6~5.6/3.6 长 3 ~9 m；6.3/4~9/5.6 长 4 ~12 m，10/6.3~14/9 长 4 ~19 m；16/10~20/120.5 长 6 ~19 m。

②制造钢号：A 3、A3F、B3F 等。

③标记举例：普通碳素钢甲类平炉 3 号沸腾钢 160×100×12 mm 的热轧不等边角钢的标记为：热轧不等边角钢 $\frac{160\times100\times12—\text{YB } 167—65}{\text{A } 3 \text{ F}—\text{YB } 170—63}$。

2 薄钢板

2.1 薄钢板品种

一般将厚度小于 4 mm 的钢板称为薄钢板，其中有热轧与冷轧两类。

1)热轧薄钢板品种　热轧薄钢板品种与规格见表 3.1.3-5。

表 3.1.3-5　**热轧薄钢板品种**（摘自 GB 708—65）

钢板厚度 (mm)	钢板宽度 (mm)												
	500	600	710	750	800	850	900	950	1000	1100	1250	1400	1500
	钢板长度 (mm)												
热轧钢板													
0.35，0.4， 0.45，0.5， 0.55，0.6，	1000 1500	1200 1500 1800	1000 1420	1000 1500 1800	1500 1600	1700	1500 1800	1500 1900	1500				

续上表

钢板厚度(mm)	钢板宽度 (mm)												
	500	600	710	750	800	850	900	950	1000	1100	1250	1400	1500
	钢板长度 (mm)												
热轧钢板													
0.7, 0.75	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000				
0.8, 0.9	1000 1500	1200 1420	1420 2000	1500 1800 2000	1500 1600 2000	1500 1700 2000	1500 1800 2000	1500 1900 2000	1500 2000				
1.0, 1.1, 1.2, 1.25, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8	1000 1500 2000	1200 1420 2000	1000 1420 2000	1000 1500 1800 2000	1500 1600 2000	1500 1700 2000	1000 1500 1800 2000	1500 1900 2000	1500 2000				
2.0, 2.2, 2.5, 2.8	500 1000 1500	600 1200 1500	1000 1420 2000	1500 1800 2000	1500 1600 2000	1500 1700 2000	1000 1500 1800 2000	1500 1900 2000	1500 2000 3000	2200 3000 4000	2500 3000 4000	2800 3000 4000	3000 4000
3.0, 3.2, 3.5, 3.8, 4.0	500 1000	600 1200	1420 2000	1000 1500 1800 2000	1500 1600 2000	1500 1700 2000	1000 1500 1800 2000	1500 1900 2000	2000 3000 4000	2200 3000 4000	2500 3000 4000	2800 3000 3500 4000	3000 3500 4000

2)冷轧薄钢板品种　冷轧薄钢板品种与规格见表 3.1.3-6。

表 3.1.3-6　冷轧薄钢板品种

钢板厚度(mm)	钢板宽度, (mm)												
	500	600	710	750	800	850	900	950	1000	1100	1250	1400	1500
	钢板长度, (mm)												
冷轧钢板													
0.2, 0.25 0.3, 0.4	1000 1500	1200 1800 2000	1420 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800		1500 2000				
0.5, 0.55, 0.6	1000 1500	1200 1800 2000	1420 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800		1500 2000				
0.7, 0.75	1000 1500	1200 1800 2000	1420 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800		1500 2000				
0.8, 0.9	1000 1500	1200 1800 2000	1420 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000		1500 2000	2000 2200	2000 2500		
1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0	1000 1500 2000	1200 1800 2000	1420 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1800 2000		2000	2000 2200	2000 2500	2800 3000 3500	2800 3000 3500
2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 3.2, 3.5, 3.8, 4.0	500 1000 1500 2000	600 1200 1800 2000	1420 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1500 1800 2000	1800		2000				

注：①经供需双方协议，可以供应比上表中更长、更宽的各种厚度的钢板。
②钢板按理论重量交货时，密度采用 7.85 g/cm³。

③标记举例：钢号20、尺寸精度B、钢板尺寸1.0×750×1500 mm、表面质量组别II、拉延级别S级的标记为：

$$钢板\frac{B-1.0\times750\times1500-GB\ 708-65}{20-II-S-GB\ 710-65}$$。

2.2 优质碳素钢薄钢板（摘自GB 710—65）

优质碳素钢薄钢板规格及机械性能见表3.1.3-7、表3.1.3-8。

表3.1.3-7　　薄钢板的品种、钢号与交货状态

品　种	制　造　钢　号	化学成分	交货状态	分　组	分　　级	用　途
品种规格符合GB 708—65的规定	(1)沸腾钢：05 F、08 F、10 F、15 F和20 F (2)半镇静钢：08 b (3)镇静钢：08、10、15、20、25、30、35、40、45和50	应符合GB 699—65的规定	钢板应在热处理（退火、正火、正火后回火、高温回火）状态下供应	按表面质量分为四组（I、II、III、IV）	按拉延级别分为：最深拉延（Z），深拉延的（S），普通拉延的（P）	用于冷作加工各种用具。

表3.1.3-8　　薄钢板的机械性能

钢　号	拉延级别 Z	S和P	Z	S	P	Z	S	P
	抗拉强度 σ_b (MPa)		伸长率 δ_{10} (%) 不小于 冷轧钢板			热轧钢板		
05 F 08 F	260～360 280～370	260～380 280～390	34 34	32 32	30 30	30 30	29 29	27 27
08 08 b 10 F	280～400	280～420	32	30	28	28	27	25
10 15 F	300～420 320～440	300～440 320～460	30 29	29 28	28 27	27 27	26 26	24 24
15 20 F	340～460	340～480	27	26	25	26	25	24
20	360～500	360～510	26	25	24	25	24	24
25	—	400～550	—	24	23	—	23	22
30	—	450～600	—	22	21	—	21	20
35	—	500～650	—	20	19	—	19	18
40	—	520～670	—	—	18	—	—	17
45	—	550～700	—	—	16	—	—	15
50	—	550～730	—	—	14	—	—	13

2.3 镀锌薄钢板

镀锌薄钢板的品种与用途见表3.1.3-9。

表3.1.3-9　　镀锌薄钢板（摘自YB180—63）

镀锌用原板	品　　种	锌层厚度	分　　组	用　途
原板应符合YB 178—65和YB 179—63中I组的规定	按YB 181—65的规定	钢板上一面的锌层厚度应不小于0.02 mm	按表面质量和形状分为三组：第I组、第II组、第III组	用于制造各种器皿

注：经供需双方协议，可供应长1440 mm、宽480 mm以及尺寸为1×1000×2400 mm的镀锌薄钢板。

2.4 空气压缩机阀片用热轧薄钢板

空气压缩机阀片用热轧薄钢板钢号与机械性能见表 3.1.3-10。

表 3.1.3-10 阀片钢号与机械性能（摘自 YB 539—65）

钢号	品种	供应状态	机械性能（经退火或回火）	
			抗拉强度σ_b (MPa)	伸长率δ_{10} (%) 不小于
30 CrMnSiA	按 GB 708—65 的规定。即从 0.20～4.0 mm范围内	钢板应在热处理（退火、正火、正火后回火、高温回火）状态下供应。并经酸洗	539.5～735.7	16

注：正火后的钢板在保证伸长率符合上表指标的条件下，其抗拉强度的上限允许比规定的数值提高 49 MPa。

2.5 弹簧钢薄钢板

弹簧钢薄钢板钢号品种与机械性能见表 3.1.3-11、表 3.1.3-12。

表 3.1.3-11 薄钢板的钢号、品种及供应状态（摘自GB 3279—82）

钢号	供应状态	品种
钢号及钢的化学成分应符合 GB 1222—75 的规定	应在退火或高温回火状态下供应	钢板的品种按 GB 708—65 的规定。其厚度范围为：0.7～4 mm，用热轧方法制成（注：经双方协议，可试制供应厚度小于或等于 2.5 mm的冷轧弹簧钢薄钢板）

表 3.1.3-12 薄钢板的机械性能（摘自GB 3279—82）

序号	钢号	机械性能	
		抗拉强度σ_b (MPa) 不大于	伸长率δ_{10} (%) 不小于
1	60 Mn	784.8	14
2	65 Mn	833.8	12
3	55 Si 2 Mn	(931.9)	(12)
4	60 Si 2 Mn	931.9	12
5	60 Si 2 MnA	931.9	13
6	60 Si 2 CrA	(1030)	(12)
7	65 Si 2 MnWA	(1030)	(6)
8	85	(735.7)	(10)

注：①厚度小于和等于 1 mm的钢板，其伸长率指标仅供参考。
②上表内未列钢号的机械性能由双方协议规定。
③上表括弧内所列指标，仅供参考，不作报废依据。

2.6 不锈钢冷轧钢板

1)类别和牌号　钢种按组织特征分为 5 类，共 55 个牌号，类别和牌号见表 3.1.3-13。

表 3.1.3-13　　不锈钢冷轧钢板类别和牌号（摘自 GB 3280—84）

类别	序号	牌号
奥氏体型	1	1 Cr 17 Mn 6 Ni 5 N
	2	1 Cr 18 Mn 8 Ni 5 N
	3	2 Cr 13 Mn 9 Ni 4
	4	1 Cr 17 Ni 7
	5	1 Cr 17 Ni 8
	6	1 Cr 18 Ni 9
	7	1 Cr 18 Ni 9 Si 3
	8	0 Cr 19 Ni 9
	9	00 Cr 19 Ni 11
	10	0 Cr 19 Ni 9 N
	11	0 Cr 19 Ni 10 NbN
	12	00 Cr 18 Ni 10 N
	13	1 Cr 18 Ni 12
	14	0 Cr 23 Ni 13
	15	0 Cr 25 Ni 20
	16	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2
	17	00 Cr 17 Ni 14 Mo 2
	18	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2 N
	19	00 Cr 17 Ni 13 Mo 2 N
	20	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)
	21	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)
	22	0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Cu 2
	23	00 Cr 18 Ni 14 Mo2Cu 2
	24	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)
	25	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)
	26	0 Cr 19 Ni 13 Mo 3
	27	00 Cr 19 Ni 13 Mo 3
	28	0 Cr 18 Ni 16 Mo 5
	29	0 Cr 18 Ni 11 Ti
	30	(1 Cr 18 Ni 9 Ti)
	31	0 Cr 18 Ni 11 Nb
	32	0 Cr 18 Ni 13 Si 4
铁素体-奥氏体型	33	00 Cr 18 Ni 5 Mo 3 Si 2
	34	1 Cr 18 Ni 11 Si 4 AlTi
	35	(1 Cr 21 Ni 5 Ti)
	36	0 Cr 26 Ni 5 Mo 2
铁素体型	37	0 Cr 13 Al
	38	00 Cr 12
	39	1 Cr 15
	40	1 Cr 17
	41	00 Cr 17
	42	1 Cr 17 Mo
	43	00 Cr 17 Mo
	44	00 Cr 18 Mo 2
	45	00 Cr 30 Mo 2
	46	00 Cr 27 Mo
马氏体型	47	1 Cr 12
	48	1 Cr 13
	49	0 Cr 13
	50	2 Cr 13
	51	3 Cr 13
	52	3 Cr 16
	53	7 Cr 17
	54	1 Cr 17 Ni 2
沉淀硬化型	55	0 Cr 17 Ni 7 Al

注：括号内的钢号不推荐使用。

2)牌号与化学成分　不锈钢冷轧钢板化学成分见表 3.1.3-14。

表 3.1.3-14

(1) 奥氏体型钢的化学成分（摘自 GB 3280—84）

序号	牌号	化学成分 (%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他
1	1 Cr 17 Mn 6 Ni 5 N	≤0.15	≤1.00	5.50~7.50	≤0.060	≤0.030	3.50~5.50	16.00~18.00	—	—	≤0.25	—
2	1 Cr 18 Mn 8 Ni 5 N	≤0.15	≤1.00	7.50~10.00	≤0.060	≤0.030	4.00~6.00	17.00~19.00	—	—	≤0.25	—
3	2 Cr 13 Mn 9 Ni 4	0.15~0.25	≤1.00	8.00~10.00	≤0.060	≤0.030	3.70~5.00	12.00~14.00	—	—	—	—
4	1 Cr 17 Ni 7	0.15~0.25	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	6.00~8.00	16.00~18.00	—	—	—	—
5	1 Cr 17 Ni 8	0.03~0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	7.00~9.00	16.00~18.00	—	—	—	—
6	1 Cr 18 Ni 9	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~10.00	17.00~19.00	—	—	—	—
7	1 Cr 18 Ni 9 Si 3	≤0.15	2.00~3.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~10.00	17.00~19.00	—	—	—	—
8	0 Cr 19 Ni 9	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~10.50	18.00~20.00	—	—	—	—
9	00 Cr 19 Ni 11	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~13.00	18.00~20.00	—	—	—	—
10	0 Cr 19 Ni 9 N	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	7.00~10.50	18.00~20.00	—	—	0.10~0.25	—
11	0 Cr 19 Ni 10 NbN	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	7.50~10.50	18.00~20.00	—	—	0.15~0.30	Nb≤0.15
12	00 Cr 18 Ni 10 N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.50~11.50	17.00~19.00	—	—	0.12~0.22	—
13	1 Cr 18 Ni 12	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.50~13.00	17.00~19.00	—	—	—	—
14	0 Cr 23 Ni 13	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	22.00~24.00	—	—	—	—
15	0 Cr 25 Ni 20	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00~22.00	24.00~26.00	—	—	—	—
16	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	—	—	—
17	00 Cr 17 Ni 14 Mo 2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	16.00~18.00	—	—	—	—
18	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2 N	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	16.00~18.00	—	—	0.10~0.22	—

续上表

序号	牌号	化学成分 (%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他
19	00 Cr 17 Ni 13 Mo 2 N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.50~14.50	16.50~18.50	—	—	0.12~0.22	—
20	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	1.80~2.50	—	—	Ti 5×C%~0.70
21	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	1.80~2.50	—	—	Ti 5 (C%-0.02) ~0.80
22	0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Cu 2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	17.00~19.00	1.20~2.75	1.00~2.50	—	—
23	00 Cr 18 Ni 14 Mo 2 Cu 2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~16.00	17.00~19.00	—	—	—	
24	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	2.50~3.50	—	—	Ti 5×C%~0.70
25	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	2.50~3.50	—	—	Ti 5 (C%-0.02) ~0.80
26	0 Cr 19 Ni 13 Mo 3	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~15.00	18.00~20.00	3.00~4.00	—	—	—
27	00 Cr 19 Ni 13 Mo 3	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~15.00	18.00~20.00	—	—	—	—
28	0 Cr 18 Ni 16 Mo 5	≤0.040	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	15.00~17.00	16.00~19.00	4.00~6.00	—	—	—
29	0 Cr 18 Ni 11 Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~13.00	17.00~19.00	—	—	—	Ti≥5×C%
30	(1 Cr 18 Ni 9 Ti)	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~11.00	17.00~19.00	—	—	—	Ti 5 (C%-0.02) ~0.80
31	0 Cr 18 Ni 11 Nb	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~13.00	17.00~19.00	—	—	—	Nb≥10×C%
32	0 Cr 18 Ni 13 Si 4	≤0.08	3.00~5.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.50~15.00	15.00~20.00	—	—	—	

(2) **奥氏体-铁素体型钢的化学成分**

续上表

序号	牌　号	化　学　成　分　(%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	其　他
33	00 Cr 18 Ni 5 Mo 3 Si 2	≦0.03	1.30~2.00	1.00~2.00	≦0.030	≦0.030	4.50~5.50	18.00~19.50	2.50~3.00	N≦0.10
34	1 Cr 18 Ni 11 Si 4 AlTi	0.10~0.18	3.40~4.00	≦0.80	≦0.035	≦0.030	10.00~12.00	17.50~19.50	—	Ti 0.40~0.70 Al 0.10~0.30
35	(1 Cr 21 Ni 5 Ti)	0.09~0.14	≦0.80	≦0.80	≦0.035	≦0.030	4.80~5.80	20.00~22.00	—	Ti 5 (C%−0.02) ~0.80
36	0 Cr 26 Ni 5 Mo 2②	≦0.08	≦1.00	≦1.50	≦0.035	≦0.030	3.00~6.00	23.00~28.00	1.00~3.00	

(3) **铁素体型钢的化学成分**

续上表

序号	牌　号	化　学　成　分　(%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	其　他③
37	0 Cr 13 Al	≦0.08	≦1.00	≦1.00	≦0.035	≦0.030	11.50~14.50	—	—	A 10.10~0.30
38	00 Cr 12	≦0.030	≦1.00	≦1.00	≦0.035	≦0.030	11.00~13.50	—	—	—
39	1 Cr 15	≦0.12	≦1.00	≦1.00	≦0.035	≦0.030	14.00~16.00	—	—	—
40	1 Cr 17	≦0.12	≦0.75	≦1.00	≦0.035	≦0.030	16.00~18.00	—	—	—
41	00 Cr 17	≦0.030	≦0.75	≦1.00	≦0.035	≦0.030	16.00~19.00	—	—	Ti 或 Nb 0.10~1.00
42	1 Cr 17 Mo	≦0.12	≦1.00	≦1.00	≦0.035	≦0.030	16.00~18.00	0.75~1.25	—	—
43	00 Cr 17 Mo	≦0.025	≦1.00	≦1.00	≦0.035	≦0.030	16.00~19.00	0.75~1.25	≦0.025	Ti、Nb、Zr 或之和 8×(C%+N%) ~0.80%
44	00 Cr 18 Mo 2	≦0.025	≦1.00	≦1.00	≦0.035	≦0.030	17.00~20.00	1.75~2.50	≦0.025	Ti、Nb、Zr 或之和 8×(C%+N%) ~0.80%
45	00 Cr 30 Mo 2④	≦0.010	≦0.40	≦0.40	≦0.030	≦0.020	28.50~32.00	1.50~2.50	≦0.015	—
46	00 Cr 27 Mo④	≦0.010	≦0.40	≦0.40	≦0.030	≦0.020	25.00~27.50	0.75~1.50	≦0.015	—

(4) 马氏体型钢的化学成分　　续上表

序号	牌号	化学成分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	其他
47	1 Cr 12	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.50~13.00	⑤
48	1 Cr 13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.50~13.50	⑤
49	0 Cr 13	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.50~13.50	⑤
50	2 Cr 13	0.16~0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	12.00~14.00	⑤
51	3 Cr 13	0.26~0.40	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	12.00~14.00	⑤
52	3 Cr 16	0.25~0.40	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	15.00~17.00	⑤
53	7 Cr 17	0.60~0.75	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	16.00~18.00	⑤⑥
54	1 Cr 17 Ni 2	0.11~0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	16.00~18.00	Ni 1.50~2.50

(5) 沉淀硬化型钢的化学成分　　续上表

序号	牌号	化学成分 (%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	其他
55	0 Cr 17 Ni 7 Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50~7.75	16.00~18.00	Al 0.75~1.50

①、②除表中规定的元素外，必要时可加入其他合金元素。③除 00 Cr 30 Mo 2、00 Cr 27 Mo 钢外，其他钢允许含有小于等于 0.60%Ni。④ 00 Cr 30 Mo 2、00 Cr 27 Mo 允许含有小于等于 0.50%Ni、小于等于 0.20%Cu、镍加铜小于等于 0.50%。另外，必要时，可添加上表以外的合金元素。⑤允许含有小于等于 0.60%Ni。⑥ 7 Cr 17 允许含有小于等于 0.75%Mo。

3)热处理制度　钢板经冷轧后，必须进行热处理。其热处理制度见表 3.1.3-15。

表 3.1.3-15　　(1) 奥氏体型钢的热处理制度（摘自 GB 3280—84）

序号	牌号	固溶处理（℃）	序号	牌号	固溶处理（℃）
1	1 Cr 17 Mn 6 Ni 5 N	1010~1120 快冷	17	00 Cr 17 Ni 14 Mo 2	1010~1150 快冷
2	1 Cr 18 Mn 8 Ni 5 N	1010~1120 快冷	18	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2 N	1010~1150 快冷
3	2 Cr 13 Mn 9 Ni 4	1080~1130 快冷	19	00 Cr 17 Ni 13 Mo 2 N	1010~1150 快冷
4	1 Cr 17 Ni 7	1010~1150 快冷	20	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)	1050~1100 快冷
5	1 Cr 17 Ni 8	1010~1150 快冷	21	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)	1050~1100 快冷
6	1 Cr 18 Ni 9	1010~1150 快冷	22	0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Cu 2	1010~1150 快冷
7	1 Cr 18 Ni 9 Si 3	1010~1150 快冷	23	00 Cr 18 Ni 14 Mo 2 Cu 2	1010~1150 快冷
8	0 Cr 19 Ni 9	1010~1150 快冷	24	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)	1050~1100 快冷
9	00 Cr 19 Ni 11	1010~1150 快冷	25	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)	1050~1100 快冷
10	0 Cr 19 Ni 9 N	1010~1150 快冷	26	0 Cr 19 Ni 13 Mo 3	1010~1150 快冷
11	0 Cr 19 Ni 10 NbN	1010~1150 快冷	27	00 Cr 19 Ni 13 Mo 3	1010~1150 快冷
12	00 Cr 18 Ni 10 N	1010~1150 快冷	28	0 Cr 18 Ni 16 Mo 5	1030~1180 快冷
13	1 Cr 18 Ni 12	1010~1150 快冷	29	0 Cr 18 Ni 11 Ti	920~1150 快冷
14	0 Cr 23 Ni 13	1030~1150 快冷	30	(1 Cr 18 Ni 9 Ti)	1000~1080 快冷
15	0 Cr 25 Ni 20	1030~1180 快冷	31	0 Cr 18 Ni 11 Nb	980~1150 快冷
16	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2	1010~1150 快冷	32	0 Cr 18 Ni 13 Si 4	1010~1150 快冷

(2) 奥氏体-铁素体型钢的热处理制度　　续上表

序　号	牌　　号	固　溶　处　理（℃）
33	00 Cr 18 Ni 5 Mo 3 Si 2	950～1050 水冷
34	1 Cr 18 Ni 11 Si 4 AlTi	1000～1050 快冷
35	(1 Cr 21 Ni 5 Ti)	950～1050 快冷
36	0 Cr 26 Ni 5 Mo 2	950～1100 快冷

(3) 铁素体型钢的热处理制度

序　号	牌　号	退火处理（℃）	序　号	牌　号	退火处理（℃）
37	0 Cr 13 Al	780～830 快冷或缓冷	42	1 Cr 17 Mo	780～850 快冷或缓冷
38	00 Cr 12	700～820 快冷或缓冷	43	00 Cr 17 Mo	800～1050 快冷
39	1 Cr 15	780～850 快冷或缓冷	44	00 Cr 18 Mo 2	800～1050 快冷
40	1 Cr 17	780～850 快冷或缓冷	45	00 Cr 30 Mo 2	900～1050 快冷
41	00 Cr 17	780～950 快冷或缓冷	46	00 Cr 27 Mo	900～1050 快冷

(4) 马氏体型钢的热处理制度

序　号	牌　号	热　处　理　（℃）		
		退　火	淬　火	回　火
47	1 Cr 12	约 750 快冷或 800～900 缓冷	—	—
48	1 Cr 13	约 750 快冷或 800～900 缓冷	—	—
49	0 Cr 13	约 750 快冷或 800～900 缓冷	—	—
50	2 Cr13	约 750 快冷或 800～900 缓冷	—	—
51	3 Cr 13	约 750 快冷或 800～900 缓冷	980～1040 快冷	150～400 空冷
52	3 Cr 16	约 750 快冷或 800～900 缓冷	—	—
53	7 Cr 17	约 750 快冷或 800～900 缓冷	1010～1070 快冷	150～400 空冷
54	1 Cr 17 Ni 2	—	970～1030 油冷	275～350

(5) 沉淀硬化型钢的热处理制度　　续上表

序　号	牌　号	热　处　理	
		种　类	条　　件
55	0 Cr 17 Ni7Al	固　溶	1000～1100℃快冷
		565℃时效	固溶处理后，于 760±15℃保持 90 min，在 1 h 内冷却到 15℃以下，保持 30 min，再加热到 565±10℃保持 90 min 后空冷
		510℃时效	固溶处理后，955±10℃保持 10 min，空冷到室温，在 24 h 内冷却到−73±6℃保持 8 h，再加热到 510±10℃保持 60 min后空冷

4)力学性能　经热处理后的力学性能见表 3.1.3-16。

表 3.1.3-16　(1) 经固溶处理的奥氏体型钢的力学性能（摘自 GB 3280—84）

序号	牌　号	拉力试验			硬度试验		
		屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	拉伸强度σ_b (MPa)	伸长率δ_5 (%)	HB	HRB	HV
1	1 Cr 17 Nn 6 Ni 5 N	≥245	≥637	≥40	≤241	≤100	≤253
2	1 Cr 18 Mn 8 Ni 5 N	≥245	≥588	≥40	≤207	≤95	≤218
3	2 Cr 13 Mn 9 Ni 4	—	≥637	≥42	—	—	—
4	1 Cr 17 Ni 7	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
5	1 Cr 17 Ni 8	≥206	≥569	≥45	≤187	≤90	≤200
6	1 Cr 18 Ni 9	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
7	1 Cr 18 Ni 9 Si 3	≥206	≥520	≥40	≤207	≤95	≤218
8	0 Cr 19 Ni 9	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
9	00 Cr 19 Ni 11	≥177	≥481	≥40	≤187	≤90	≤200
10	0 Cr 19 Ni 9 N	≥275	≥481	≥35	≤217	≤95	≤220
11	0 Cr 19 Ni 10 NbN	≥343	≥686	≥35	≤250	≤100	≤260
12	00 Cr 18 Ni 10 N	≥245	≥549	≥40	≤217	≤95	≤220
13	1 Cr 18 Ni 12	≥177	≥481	≥40	≤187	≤90	≤200
14	0 Cr 23 Ni 13	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
15	0 Cr 25 Ni 20	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
16	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
17	00 Cr 17 Ni 14 Mo 2	≥177	≥481	≥40	≤187	≤90	≤200
18	0 Cr 17 Ni 12 Mo 2 N	≥275	≥549	≥35	≤217	≤95	≤200
19	00 Cr 17 Ni 13 Mo 2 N	≥245	≥549	≥40	≤217	≤95	≤200
20	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)	≥206	≥529	≥35	≤187	≤90	≤200
21	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti)	≥206	≥529	≥35	≤187	≤90	≤200
22	0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Cu 2	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
23	00 Cr 18 Ni 14 Mo 2 Cu 2	≥177	≥481	≥40	≤187	≤90	≤200
24	(0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)	≥206	≥529	≥35	≤187	≤90	≤200
25	(1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti)	≥206	≥529	≥35	≤187	≤90	≤200
26	0 Cr 19 Ni 13 Mo 3	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
27	00 Cr 19 Ni 13 Mo 3	≥177	≥481	≥40	≤187	≤90	≤200
28	0 Cr 18 Ni 16 Mo 5	≥177	≥481	≥40	≤187	≤90	≤200
29	0 Cr 18 Ni 11 Ti	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
30	(1 Cr 18 Ni 9 Ti)	≥206	≥539	≥40	≤187	≤90	≤200
31	0 Cr 18 Ni 11 Nb	≥206	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
32	0 Cr 18 Ni 13 Si 4	≥206	≥520	≥40	≤207	≤95	≤218

(2) 不同冷作硬化状态的力学性能

续上表

序号	牌号	状态符号	拉力试验				
			屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	拉伸强度σ_b (MPa)	伸长率δ_5, (%)		
					厚度 <0.4 mm	厚度 >0.4 mm <0.8 mm	厚度 ≥0.8 mm
3	2 Cr 13 Mn 9 Ni 4	H	—	≥981	≥15		
4	1 Cr 17 Ni 7	1/4 H	≥510	≥863	≥25	≥25	≥25
		1/2 H	≥755	≥1030	≥9	≥10	≥10
		3/4 H	≥932	≥1206	≥3	≥5	≥7
		H	≥961	≥1275	≥3	≥4	≥5

(3) 经固溶处理的奥氏体-铁素体型钢的力学性能

序号	牌号	拉力试验			硬度试验		
		屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度σ_b (MPa)	伸长率δ_5 (%)	HB	HRC	HV
33	00 Cr 18 Ni 5 Mo 3 Si 2	≥392	≥588	≥20	—	≤30	≤300
34	(1 Cr 18 Ni 11 Si 4 AlTi)	—	≥716	≥30	—	—	—
35	(1 Cr 21 Ni 5 Ti)	—	≥637	≥20	—	—	—
36	0 Cr 26 Ni 5 Mo 2	≥392	≥588	≥18	≤277	≤29	≤292

(4) 经退火处理的铁素体型钢的力学性能

序号	牌号	拉力试验			硬度试验			弯曲试验
		屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	拉伸强度σ_b (MPa)	伸长率δ (%)	HB	HRB	HV	180° d—弯心直径，a—钢板厚度
37	0 Cr 13 Al	≥177	≥412	≥20	≤183	≤88	≤200	$a<8$ mm $d=a$ $a\geq 8$ mm $d=2a$
38	00 Cr 12	≥196	≥363	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
39	1 Cr 15	≥206	≥451	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
40	1 Cr 17	≥206	≥451	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
41	00 Cr 17	≥177	≥363	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
42	1 Cr 17 Mo	≥206	≥451	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
43	00 Cr 17 Mo	≥245	≥412	≥20	≤217	≤96	≤230	$d=2a$
44	00 Cr 18 Mo 2	≥245	≥412	≥20	≤217	≤96	≤230	$d=2a$
45	00 Cr 30 Mo 2	≥294	≥451	≥22	≤209	≤95	≤220	$d=2a$
46	00 Cr 27 Mo	≥245	≥412	≥22	≤190	≤90	≤200	$d=2a$

(5) 经退火处理的马氏体型钢的力学性能　　续上表

序号	牌　号	拉　力　试　验			硬　度　试　验			弯曲试验
		屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度σ_b (MPa)	伸长率δ (%)	HB	HRB	HV	180° d—弯心直径 a—钢板厚度
47	1 Cr 12	≧206	≧441	≧20	≦200	≦93	≦210	$d=2a$
48	1 Cr 13	≧206	≧441	≧20	≦200	≦93	≦210	$d=2a$
49	0 Cr 13	≧206	≧412	≧20	≦183	≦88	≦200	$d=2a$
50	2 Cr 13	≧226	≧520	≧18	≦223	≦97	≦234	—
51	3 Cr 13	≧226	≧539	≧18	≦235	≦99	≦247	—
52	3 Cr 16	≧226	≧520	≧18	≦241	≦100	≦253	—
53	7 Cr 17	≧245	≧588	≧15	≦255	HRC ≦25	≦269	—
54	1 Cr 17 Ni 2①		≧1079	≧10				—

(6) 经淬火、回火处理的马氏体型钢的硬度

序　号	牌　　号	HRC
51	3 Cr 13	≧40
53	7 Cr 17	≧40
54	1 Cr 17 Ni 2	需方要求时，由供需双方协商规定

(7) 沉淀硬化型钢的力学性能

序号	牌　号	热处理种类	拉　力　试　验			硬　度　试　验			
			屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度σ_b (MPa)	伸长率$\delta_5$② (%)	HB	HRC	HRB	HV
4	0 Cr 17 Ni 7 Al	固溶	≦382	≦1030	≧20	≦190	—	≦92	≦200
		565℃时效	≧961	≧1136	a≦3.0 mm, ≧3; >3.0 mm, ≧5	—	≧35	—	≧345
		510℃时效	≧1030	≧1226	a≦3.0 mm, 不作规定; >3.0 mm, ≧4	—	≧40	—	≧392

① 1 Cr 17 Ni 2 为淬火回火状态拉伸性能。
② a为钢板厚度。

3 厚钢板

3.1 热轧厚钢板品种

热轧厚钢板的品种见表 3.1.3-17。

表 3.1.3-17 **热轧厚钢板品种**（摘自 GB 709—65）

厚度 (mm)	宽度 (m)									
	0.6~1.2	>1.2 ~1.5	>1.5 ~1.6	>1.6 ~1.7	>1.7 ~1.8	>1.8 ~2.0	>2.0 ~2.2	>2.2 ~2.5	>2.5 ~2.8	>2.8 ~3.0
	最大长度 (m)									
4.5~5.5	12	12	12	12	12	6	—	—	—	—
6~7	12	12	12	12	12	10	—	—	—	—
8~10	12	12	12	12	12	12	9	9	—	—
11~15	12	12	12	12	12	12	9	8	8	8
16~20	12	12	12	10	10	9	8	7	7	7
21~25	12	11	11	10	9	8	7	6	6	6
26~30	12	10	9	9	9	8	7	6	6	6
32~34	12	9	8	7	7	7	7	7	6	5
36~40	10	8	7	7	6.5	6.5	5.5	5.5	5	—
42~50	9	8	7	7	6.5	6	5	4	—	—
52~60	8	6	6	6	5.5	5	4.5	4	—	—

注：①经供需双方协议，可供应比上表更长，更宽的各种厚度的钢板。

②厚度>4~6 mm 的，其间隔为 0.5 mm；>6~30 mm 的，其间隔为 1 mm；>30~60 mm 的，其间隔为 2 mm。宽度间隔为 50 mm。

长度为 100 mm 的倍数，但不得小于 1200 mm。

③标记举例：用A 3 号钢轧制的 10×1800×4500 mm的钢板标记为：

厚钢板$\frac{10\times1800\times4500\text{—GB 709—65}}{\text{A 3—YB 175—63}}$。

3.2 优质碳素结构钢热轧厚钢板

钢板的品种按表 3.1.3-17 的规定供应，供应时已经过热处理（退火、正火或高温回火）。优质碳素结构钢热轧厚钢板的机械性能见表 3.1.3-18。

表 3.1.3-18　**厚钢板的机械性能**（摘自 GB 711—85）

序号	钢号		抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)
	牌号	代号	不小于	
1	08 沸	08 F	294	35
2	08	08	328	33
3	10 沸	10 F	314	33
4	10	10	334	31
5	15 沸	15 F	353	29
6	15	15	373	27
7	20 沸	20 F	383	27
8	20	20	412	25
9	25	25	451	23
10	30	30	490	21
11	35	35	530	20
12	40	40	569	19
13	45	45	598	16
14	50	50	628	14
15	55	55	648	13
16	60	60	677	12
17	65	65	697	10
18	70	70	715	9
19	15 锰	15 Mn	412	26
20	20 锰	20 Mn	451	24
21	30 锰	30 Mn	540	20
22	40 锰	40 Mn	588	17
23	50 锰	50 Mn	648	13
24	60 锰	60 Mn	697	11
25	65 锰	65 Mn	736	9
26	70 锰	70 Mn	785	8

注：①不经热处理交货的钢板，其机械性能由双方协议规定；无协议条件时，供方可将试样正火后测定其机械性能．各项指标应符合上表规定。

② 08 钢可以用铝代硅脱氧，但其各项性能应符合 08 钢的要求。

3.3　普通碳素钢和低合金钢热轧厚钢板

钢板厚度尺寸为 4 ～60 mm；品种按表 3.1.3-17 的规定供应，供应时钢板处于热轧状态；经需方提出要求，也可按热处理状态供应。

3.4　制造锅炉用碳素钢及普通低合金钢钢板

锅炉钢板的品种尺寸亦按表 3.1.3-17 的规定供应，其厚度为 6 ～115 mm。锅炉钢板主要用于制造船舶锅炉及其它锅炉重要附件。

锅炉钢板的化学成分及机械性能见表 3.1.3-19、表 3.1.3-20。

表 3.1.3-19 **锅炉钢板的化学成分**

序号	钢号 牌号	代号	化学成分(%) C	Si	Mn	V	Mo	Nb	P 不大于	S 不大于
1	20钢	20 g	0.16~0.24	0.15~0.30	0.35~0.65				0.040	0.045
2	22钢	22 g	0.19~0.26	0.17~0.37	0.70~0.90				0.040	0.045
3	12锰钢	12 Mng	≤0.16	0.20~0.60	1.10~1.50				0.040	0.045
4	16锰钢	16 Mng	0.12~0.20	0.20~0.60	1.20~1.60				0.040	0.045
5	15锰钒钢	15 MnVg	0.10~0.18	0.20~0.60	1.20~1.60	0.04~0.12			0.040	0.045
6	14锰钼钒钢	14 MnMoVg	0.10~0.18	0.20~0.50	1.20~1.60	0.05~0.15	0.40~0.65		0.040	0.045
7	18锰钼铌钢	18 MnMoNbg	0.17~0.23	0.17~0.37	1.35~1.65		0.45~0.65	0.025~0.050	0.040	0.045

注：①20 g、22 g在机械性能合格下，其含碳量下限可不限。
②钢中残余含铜量不大于0.35%。
③对于14 MnMoVg钢种，V、Mo含量通过协商可适当调整。
④钢板成品分析，允许与上表中规定有如下偏差：
C ………… ±0.02%
Mn ………… ±0.10%
Si ………… ±0.05%
V ………… +0.02% −0.01%
Nb ………… ±0.005%
Mo ………… ±0.05%
⑤经双方协议，对于高磷地区钢的含磷量允许达到0.045%。

表 3.1.3-20 **锅炉钢板的机械性能**

序号	钢号 牌号	代号	交货状态	钢板厚度 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	屈服强度 σ_s (MPa) 不小于	伸长率 δ_5 % 不小于	常温冲击值 a_K (J/cm²) 不小于	应变时效值 a_k (J/cm²) 不小于	180°冷弯试验（弯心直径为d试样厚度为a）
1	20钢	20 g	热轧或热处理	6~16 17~25 26~36 37~60	402	245 235 225 225	26 25 24 23	60	35	$d=2a$
2	22钢	22 g	热轧或热处理	6~60	422	264	24	60	30	$d=2a$
3	12锰钢	12 Mng	热轧或热处理	6~16 17~25	411 431	294 274	21 19	60	30	$d=2a$ $d=3a$

续上表

序号	钢号 牌号	钢号 代号	交货状态	钢板厚度 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	屈服强度 σ_s (MPa) 不小于	伸长率 δ_5 % 不小于	常温冲击值 a_K (J/cm²) 不小于	应变时效值 a_k (J/cm²) 不小于	180°冷弯试验（弯心直径为d试样厚度为a）
4	16锰钢	16 Mng	热轧或热处理	6～16 17～25 26～36 37～60	510 490 470 470	343 323 304 284	21 19 19 19	60	30	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$ $d=3a$
5	15锰钒钢	15 MnVg	热轧或热处理	6～16 17～25 26～36 37～60	529 510 510 490	392 372 353 333	18 17 17 17	60	30	$d=3a$
6	14锰钼钒钢	14 MnMoVg	热处理	30～115	637	490	16			$d=3a$
7	18锰钼铌钢	18 MnMoNbg	热处理	16～38 40～95 100～115	637 637 588	510 490 441	17 16 16	70	30	$d=3a$

3.5 花纹钢板

花纹钢板的图案与尺寸见表 3.1.3-21。

表 3.1.3-21　　**花纹钢板的图案与尺寸**（GB 3277-82）

钢板基本厚度 (mm)	纹高 (mm) 菱形	纹高 (mm) 扁豆形	钢板宽度 (mm)	钢板长度 (mm)	理论质量 (kg/m²) 菱形	理论质量 (kg/m²) 扁豆形
2.5	1.0	2.5	由600～1800 mm，其宽度以50 mm进级	由600～12000 mm，其长度以100 mm进级	21.6	22.6
3	1.0	2.5			25.6	26.6
3.5	1.0	2.5			29.5	30.5
4	1.0	2.5			33.4	34.4
4.5	1.0	2.5			37.3	38.3
5	1.5	2.5			42.3	42.3
5.5	1.5	2.5			46.2	46.2
6	1.5	2.5			50.1	50.1
7	2.0	2.5			59.0	58.0
8	2.0	2.5			66.8	65.8

3.6 压力容器用碳素钢及普通低合金钢热轧厚钢板

钢板品种亦按表 3.1.3-17 的规定供应；厚度大于 60 mm 的钢板按供需双方的协议供应。钢板按热轧状态交货，如需方提出要求，亦可按热处理状态交货。

压力容器用钢板的化学成分与机械性能见表 3.1.3-22、表 3.1.3-23（摘自 YB 536—69）。

表 3.1.3-22　压力容器用钢板的化学成分

序号	钢号		化学成分 (%)								
	牌号	代号	C	Si	Mn	V	Mo	N	Nb	P	S
										不大于	
1	甲3容	A3R	≤0.22	0.12~0.30	0.40~0.65					0.040	0.045
2	16锰容	16MnR	≤0.20	0.20~0.60	1.20~1.60					0.040	0.045
3	15锰钒容	15MnVR	≤0.18	0.20~0.60	1.20~1.60	0.04~0.12				0.040	0.045
4	15锰钒氮容	15MnVNTR	0.12~0.20	0.20~0.50	1.30~1.70	0.16~0.25		0.014~0.022		0.040	0.045
5	09锰2钒容	09Mn2VR	≤0.12	0.20~0.50	1.40~1.80	0.04~0.10				0.040	0.040
6	18锰钼铌容	18MnMoNbR	0.17~0.23	0.17~0.37	1.35~1.65		0.45~0.65		0.025~0.05	0.040	0.040
7	18铌半容	18NbbR	0.14~0.22	≤0.17	0.40~0.80				0.015~0.050	0.050	0.045
8	14锰铌半容	14MnNbbR	0.12~0.18	≤0.17	0.80~1.20				0.015~0.050	0.050	0.045

表 3.1.3-23　　压力容器用钢板的机械性能

序号	钢号		钢板原度(mm)	屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_s %	常温冲击值 α_k (J/cm²)	180°冷弯试验（弯心直径为 d，试样厚度为 α）
	牌 号	代号		不 小 于				
1	甲3容	A3R	6～16 17～26 27～36 38～60	240 230 230 220	380 380 380 380	26 26 26 26	70 65 60 60	$d=1.5a$
2	16锰容	16MnR	6～16 17～26 27～26 38～60	350 330 310 290	520 500 500 480	21 20 19 19	60	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$ $d=3a$
3	15锰钒容	15MnVR	6～16 17～26 27～36 38～60	400 380 360 340	540 520 520 500	18 17 17 17	60	$d=3a$
4	15锰钒氮容	15MnVNTR	11～26 27～36 38～50	450 430 410	600 570 550	18 17 17	60	$d=3a$
5	09锰2钒容	09Mn2VR	5～20	350	500	21	35（－70℃冲击值）	$d=2a$
6	18锰钼铌容	18MnMoNbR	16～38 40～95 100～115	520 500 450	650 650 600	16 16 16	70	$d=3a$
7	18铌半容	18NbbR	6～16	300	440	23	60	$d=2a$
8	14锰铌半容	14MnNbbR	6～16 17～24	350 330	00 480	21 20	60	$d=2a$ $d=3a$

3.7 不锈、耐酸及耐热钢厚钢板

钢板厚度为 4～25 mm，其它尺寸按表 3.1.3-17 中的规定。钢板经热处理、酸洗和切边后交货。

1)不锈耐酸及耐热钢厚钢板的牌号和化学成分　不锈耐酸及耐热钢厚钢板的牌号见表 3.1.3-24。

表 3.1.3-24　　不锈耐酸及耐热钢厚钢板牌号（摘自 GB 3281—82）

组织分类	牌　　号
铁素体系	0Cr13, 1Cr17, 0Cr17Ti, 1Cr17Ti, 1Cr25Ti
马氏体系	1Cr13, 2Cr13, 3Cr13, 4Cr13, 1Cr17Ni2
奥氏体系	00Cr18Ni10, 0Cr18Ni9, 1Cr18Ni9, 2Cr18Ni9, 0Cr18Ni9Ti, 1Cr18Ni9Ti, 1Cr18Mn8Ni5N, 0Cr18Ni12Mo2Ti, 1Cr18Ni12Mo2Ti, 0Cr18Ni12Mo3Ti, 1Cr18Ni12Mo3Ti, 00Cr17Ni14Mo2, 00Cr17Ni14Mo3, 00Cr18Ni14Mo2Cu2, 0Cr23Ni28Mo3Cu3Ti, 1Cr23Ni13, 1Cr23Ni18, 1Cr20Ni14Si2, 1Cr25Ni20Si2, 3Cr18Ni25Si2
奥氏体-铁素体系	0Cr21Ni5Ti, 1Cr21Ni5Ti

钢的化学成分（熔炼分析）和成品钢的化学成分允许偏差应符合 GB 122－75《不锈耐酸钢技术条件》和 GB 1221—75《耐热钢技术条件》的规定。但下列牌号的硅含量和钼含量应

符合以下规定:

0 Cr 13, 1 Cr 13, 2 Cr 13, 3 Cr 13, 4 Cr 13 的硅含量为不大于 0.80%;

0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti, 1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti, 00 Cr 17 Ni 14 Mo 3 的钼含量为 3.00%~4.00%; 0 Cr 17 Ni 14 Mo 2 的钼含量为 2.00%~3.00%。

2)机械性能 不锈耐酸及耐热钢厚钢板机械性能见表 3.1.3-25。

表 3.1.3-25 不锈耐酸及耐热钢厚钢板机械性能① (摘自 GB 3281—82)

组织分类	序号	牌号	机械性能			推荐热处理制度
			抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	
			不小于			
铁素体系	1	0 Cr 13	422		23	760~800℃ 缓冷
	2	1 Cr 17	441		18	750~780℃ 空冷或水冷
	3	0 Cr 17 Ti	441		18	750~780℃ 空冷或水冷
	4	1 Cr 17 Ti	441		18	750~780℃ 空冷或水冷
	5	1 Cr 25 Ti	510		15	750~780℃ 空冷或水冷
马氏体系	6	1 Cr 13	461		21	760~800℃ 缓冷
	7	2 Cr 13	490		20	760~800℃ 缓冷
	8	3 Cr 13	540		17	760~800℃ 缓冷
	9	4 Cr 13	588		15	760~800℃ 缓冷
	10	1 Cr 17 Ni 2	1030		10	970~1030℃ 油冷 275~350℃ 回火
奥氏体系	11	00 Cr 18 Ni 10	490	176	40	1050~1100℃ 水冷或空冷
	12	0 Cr 18 Ni 9	530	206	45	1050~1100℃ 水冷或空冷
	13	1 Cr 18 Ni 9	540	206	38	1050~1120℃ 水冷或空冷
	14	2 Cr 18 Ni 9	588		35	1100~1150℃ 水冷或空冷
	15	0 Cr 18 Ni 9 Ti	490	206	40	1000~1080℃ 水冷或空冷
	16	1 Cr 18 Ni 9 Ti	520	206	38	1000~1080℃ 水冷或空冷
	17	1 Cr 18 Mn 8 Ni 5 N	637	245	(40)	1050~1100℃ 水冷或空冷

续上表

组织分类	序号	牌号	机械性能			推荐热处理制度
			抗拉强度σ_b (MPa)	屈服强度$\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率δ_5 (%)	
			不小于			
奥氏体系	18	0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti	530	206	37	1050～1100℃ 水冷或空冷
	19	1 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti	530	206	37	1050～1100℃ 水冷或空冷
	20	0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti	530	206	(35)	1050～1100℃ 水冷或空冷
	21	1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti	530	206	35	1050～1100℃ 水冷或空冷
	22	00 Cr 17 Ni 14 Mo 2	490	157	40	1050～1100℃ 水冷或空冷
	23	00 Cr 17 Ni 14 Mo 3	490	157	40	1050～1100℃ 水冷或空冷
	24	00 Cr 18 Ni 14 Mo 2 Cu 2	490	157	40	1050～1100℃ 水冷或空冷
	25	0 Cr 23 Ni 28 Mo 3 Cu 3 Ti	520		(35)	1050～1080℃ 水冷或空冷
	26	1 Cr 23 Ni 13	549		34	1080～1130℃ 水冷或空冷
	27	1 Cr 23 Ni 18	549		34	1080～1130℃ 水冷或空冷
	28	1 Cr 20 Ni 14 Si 2	588		40	1080～1130℃ 水冷或空冷
	29	1 Cr 25 Ni 20 Si 2	540		35	1080～1130℃ 水冷或空冷
	30	3 Cr 18 Ni 25 Si 2	442		(35)	1080～1130℃ 水冷或空冷
奥氏体—铁素体系	31	0 Cr 21 Ni 5 Ti	442		20	950～1050℃ 水冷或空冷
	32	1 Cr 21 Ni 5 Ti	442		(20)	950～1050℃ 水冷或空冷

① 除 1 Cr 17 Ni 2 系指试样热处理制度及机械性能外，其它牌号均为钢板供应状态的热处理制度及机械性能。

4　无缝钢管

4.1　无缝钢管分类、钢号、化学成分与机械性能

无缝钢管品种见表 3.1.3-26、表 3.1.3-27。

表 3.1.3-26

热轧无缝钢管品种

外径 (mm)	壁厚 (mm)																	
	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12
	理论质量 (kg/m)																	
32	1.82	2.15	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.09	4.32	4.53	4.74	—	—	—	—	—	—
38	2.19	2.59	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.05	5.35	5.64	5.92	—	—	—	—	—	—
42	2.44	2.89	3.35	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	5.69	6.04	6.38	6.71	7.02	7.32	7.60	7.88	—	—
45	2.62	3.11	3.58	4.04	4.49	4.93	5.36	5.77	6.17	6.56	6.94	7.30	7.65	7.99	8.32	8.63	—	—
50	2.93	3.48	4.01	4.54	5.05	5.55	6.04	6.51	6.97	7.42	7.86	8.29	8.70	9.10	9.49	9.86	—	—
54	—	3.77	4.36	4.93	5.49	6.04	6.58	7.10	7.61	8.11	8.60	9.08	9.54	9.99	10.43	10.85	11.67	—
57	—	4.00	4.62	5.23	5.83	6.41	6.99	7.55	8.10	8.63	9.16	9.67	10.17	10.65	11.13	11.59	12.48	13.32
60	—	4.22	4.88	5.52	6.16	6.78	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.26	10.80	11.32	11.83	12.33	13.29	14.21
63.5	—	4.48	5.18	5.87	6.55	7.21	7.87	8.51	9.14	9.75	10.36	10.95	11.53	12.10	12.65	13.19	14.24	15.24
68	—	4.81	5.57	6.31	7.05	7.77	8.48	9.17	9.86	10.53	11.19	11.84	12.47	13.10	13.71	14.30	15.46	16.57
70	—	4.96	5.74	6.51	7.27	8.01	8.75	9.47	10.18	10.88	11.56	12.23	12.89	13.54	14.17	14.80	16.01	17.16
73	—	5.18	6.00	6.81	7.60	8.38	9.16	9.91	10.66	11.39	12.11	12.82	13.52	14.21	14.88	15.54	16.82	18.05
76	—	5.40	6.26	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42	14.15	14.87	15.58	16.28	17.63	18.94
83	—	—	6.86	7.79	8.71	9.62	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80	15.62	16.42	17.22	18.00	19.53	21.01
89	—	—	7.38	8.38	9.38	10.36	11.33	12.28	13.22	14.16	15.07	15.98	16.87	17.76	18.63	19.48	21.16	22.79
95	—	—	7.90	8.98	10.04	11.10	12.14	13.17	14.19	15.19	16.18	17.16	18.13	19.09	20.03	20.96	22.79	24.56
102	—	—	8.50	9.67	10.82	11.96	13.09	14.21	15.31	16.40	17.48	18.55	19.60	20.64	21.67	22.69	24.69	26.63
108	—	—	—	10.26	11.49	12.70	13.90	15.09	16.27	17.44	18.59	19.73	20.86	21.97	23.08	24.17	26.31	28.41
114	—	—	—	10.85	12.15	13.44	14.72	15.98	17.23	18.47	19.70	20.91	22.12	23.31	24.48	25.65	27.94	30.19
121	—	—	—	11.54	12.93	14.30	15.67	17.02	18.35	19.68	20.99	22.29	23.58	24.86	26.12	27.37	29.84	32.26
127	—	—	—	12.13	13.59	15.04	16.48	17.90	19.32	20.72	22.10	23.48	24.84	26.19	27.53	28.85	31.47	34.03
133	—	—	—	12.73	14.26	15.78	17.29	18.79	20.28	21.75	23.21	24.66	26.10	27.52	28.93	30.33	33.10	35.81
140	—	—	—	—	15.04	16.65	18.24	19.83	21.40	22.96	24.51	26.04	27.57	29.08	30.57	32.06	34.99	37.88
146	—	—	—	—	15.70	17.39	19.06	20.72	22.36	24.00	25.62	27.23	28.82	30.41	31.98	33.54	36.62	39.66
152	—	—	—	—	16.37	18.13	19.87	21.60	23.32	25.03	26.73	28.41	30.08	31.74	33.39	35.02	38.25	41.43

续上表

外径 (mm)	壁厚 (mm)																	
	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12
	理论质量 (kg/m)																	
159	—	—	—	—	17.15	18.99	20.82	22.64	24.45	26.24	28.02	29.79	31.55	33.29	35.03	36.75	40.15	43.50
168	—	—	—	—	—	20.10	22.04	23.97	25.89	27.79	29.69	31.57	33.43	35.29	37.13	38.97	42.59	46.17
180	—	—	—	—	—	21.59	23.70	25.75	27.70	29.87	31.91	33.93	35.95	37.95	39.95	41.92	45.85	49.72
194	—	—	—	—	—	23.31	25.60	27.82	30.00	32.28	34.50	36.70	38.89	41.06	43.23	45.38	49.64	53.86
203	—	—	—	—	—	—	—	29.14	31.50	33.83	36.16	38.47	40.77	43.05	45.33	47.59	52.08	56.52
219	—	—	—	—	—	—	—	31.52	34.06	36.60	39.12	41.63	44.12	46.61	49.08	51.54	56.43	61.26
245	—	—	—	—	—	—	—	—	38.23	41.09	43.85	46.76	49.56	52.38	55.17	57.95	63.48	68.95
273	—	—	—	—	—	—	—	—	42.64	45.92	49.10	52.28	55.45	58.60	61.73	64.86	71.07	77.24
299	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	53.91	57.41	60.89	64.37	67.83	71.27	78.13	84.93
325	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.74	62.54	66.35	70.14	73.92	77.68	85.18	92.63
351		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	67.67	71.80	75.91	80.01	84.10	92.23	100.32
377	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	81.68	86.10	90.51	99.29	108.02
402	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	87.21	91.95	96.67	106.06	115.41
426	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	92.55	97.57	102.59	112.58	122.52
450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	97.87	103.20	108.50	119.08	130.61
(465)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	101.10	116.48	112.20	123.15	134.05
480	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	104.52	110.22	115.90	127.22	139.49
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	108.96	114.91	120.83	132.65	145.41
530	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	115.62	121.94	128.23	140.78	154.29
(550)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	120.07	126.62	133.10	146.21	159.20
560	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	122.28	128.97	135.63	148.92	163.16
600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	131.17	138.34	145.50	159.78	175.00
630	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	137.81	145.36	152.89	167.91	183.88

续上表

外径 (mm)	壁厚 (mm)														
	13	14	15	16	17	18	19	20	22	(24)	25	(26)	28	30	32
		理论质量 (kg/m)													
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
57	14.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	15.07	15.88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
63.5	16.19	17.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
68	17.63	18.64	19.61	20.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	18.27	19.33	20.35	21.31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
73	19.24	20.37	21.46	22.49	23.48	24.41	25.30	—	—	—	—	—	—	—	—
76	20.20	21.41	22.57	23.68	24.74	25.75	26.71	—	—	—	—	—	—	—	—
83	22.44	23.82	25.15	26.44	27.67	28.85	29.99	—	—	—	—	—	—	—	—
89	24.37	25.89	27.37	28.80	30.19	31.52	32.80	34.03	36.35	38.47	—	—	—	—	—
95	26.29	27.97	29.59	31.17	32.70	34.18	35.61	36.99	39.61	42.02	—	—	—	—	—
102	28.53	30.38	32.18	33.93	35.64	37.29	38.89	40.44	43.40	46.17	—	—	—	—	—
108	30.46	32.45	34.40	36.30	38.15	39.95	41.70	43.40	46.66	49.72	51.17	52.58	55.24	—	—
114	32.38	34.53	36.62	38.67	40.67	42.62	44.51	46.36	49.91	53.27	54.87	56.43	59.38	—	—
121	34.62	36.94	39.21	41.43	43.60	45.72	47.79	49.82	53.71	57.41	59.19	60.91	64.22	—	—
127	36.55	39.01	41.43	43.80	46.12	48.39	50.61	52.78	56.97	60.96	62.89	64.76	68.36	71.76	—
133	38.47	41.09	43.65	46.17	48.63	51.05	53.42	55.73	60.22	64.51	66.59	68.61	72.50	76.20	79.71
140	40.72	43.50	46.24	48.93	51.57	54.16	56.70	59.19	64.02	68.66	70.90	73.10	77.34	81.38	85.23
146	42.64	45.57	48.46	51.30	54.08	56.82	59.51	62.15	67.27	72.21	74.60	76.94	81.48	85.82	89.97
152	44.56	47.65	50.68	53.66	56.60	59.48	62.32	65.11	70.59	75.76	78.30	80.79	85.62	90.26	94.70

续上表

外径 (mm)	壁厚 (mm)														
	13	14	15	16	17	18	19	20	22	(24)	25	(26)	28	30	32
	理论质量 (kg/m)														
159	46.81	50.06	53.27	56.43	59.53	62.59	65.60	68.56	74.33	79.90	82.62	85.28	90.46	95.44	100.22
168	49.69	53.17	56.60	59.98	63.31	66.59	69.82	73.00	79.21	85.23	88.16	91.05	96.67	102.10	107.33
180	53.54	57.31	61.04	64.71	68.34	71.91	75.44	78.92	85.72	92.33	95.56	98.74	104.96	110.98	116.80
194	58.03	62.15	66.22	70.24	74.21	78.13	82.00	85.28	93.32	100.62	104.19	107.72	114.63	121.33	127.85
203	60.91	65.94	69.54	73.78	77.97	82.12	86.21	90.26	98.20	105.94	109.74	113.49	120.83	127.99	134.94
219	66.04	70.78	75.46	80.10	84.69	89.23	93.71	98.15	106.88	115.42	119.61	123.75	131.89	139.83	147.57
245	74.38	79.76	83.08	90.36	95.59	100.77	105.90	110.98	120.99	130.80	135.64	140.42	149.84	159.07	168.09
273	83.36	89.42	95.44	101.41	107.33	113.20	119.02	124.79	136.18	147.38	152.90	158.38	169.18	179.78	190.19
299	91.69	98.40	105.06	111.67	118.23	124.74	131.20	137.61	150.29	162.77	168.93	175.05	187.13	199.02	210.71
325	100.03	107.38	114.68	121.93	129.13	136.28	143.38	150.44	164.39	178.15	184.96	191.72	205.09	218.25	231.23
351	108.36	116.35	124.29	132.19	140.03	147.82	155.56	163.26	178.50	193.54	200.99	208.39	223.04	237.49	251.74
377	117.00	125.33	133.91	142.44	150.93	159.36	167.75	176.08	192.61	208.93	217.02	225.06	240.99	256.73	272.26
402	124.71	133.94	143.15	152.30	161.40	170.45	179.45	188.40	206.16	223.72	232.42	241.08	258.24	275.21	291.18
426	132.41	142.25	152.04	161.78	171.47	181.11	190.71	200.25	219.19	237.93	247.23	256.48	274.83	292.98	310.93
450	140.09	150.52	160.90	171.24	181.52	191.76	201.94	212.08	232.20	252.12	262.01	271.85	291.38	310.72	329.84
(465)	144.90	155.70	166.46	177.16	187.81	198.41	208.97	219.47	240.34	261.00	271.26	281.47	301.74	321.81	341.69
480	149.71	160.88	172.00	183.08	194.10	205.07	216.00	226.87	248.47	269.88	280.51	291.09	312.10	332.91	353.52
500	156.12	167.79	179.40	190.97	202.48	213.95	225.37	236.74	259.32	281.72	292.84	303.91	325.91	347.71	369.30
530	165.74	178.14	190.50	202.80	215.06	227.27	239.42	251.53	275.60	299.47	317.50	323.14	346.62	369.90	392.92
(550)	172.15	185.05	197.90	210.70	223.44	236.14	248.80	261.40	286.45	311.31	323.66	335.97	360.43	384.70	406.76
560	175.36	188.50	201.60	214.64	227.64	240.58	253.48	266.33	291.88	317.23	—	—	—	—	—
600	188.18	202.31	216.39	230.42	244.40	258.34	272.22	286.06	313.58	340.90	—	—	—	—	—
630	197.80	212.67	227.49	242.26	256.98	271.66	286.28	300.85	329.85	358.66	—	—	—	—	—

续上表

外径 (mm)	壁厚 (mm)														
	(34)	(35)	36	(38)	40	(42)	(45)	(48)	50	56	60	63	(65)	70	75
	理论质量 (kg/m)														
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
63.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
102	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
108	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
114	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
121	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
127	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
133	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
140	88.88	90.63	92.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
146	93.91	95.81	97.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
152	98.94	100.99	102.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续上表

外径 (mm)	壁厚 (mm)														
	(34)	(35)	36	(38)	40	(42)	(45)	(48)	50	56	60	63	(65)	70	75
	理论质量 (kg/m)														
159	104.81	107.03	109.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
168	112.36	114.80	117.19	121.83	126.27	130.51	136.50	—	—	—	—	—	—	—	—
180	122.42	125.16	127.85	133.07	138.10	142.94	149.82	—	—	—	—	—	—	—	—
194	134.16	137.24	140.27	146.19	151.91	157.44	165.36	—	—	—	—	—	—	—	—
203	141.70	145.00	148.26	154.62	160.78	166.75	175.33	183.47	188.65	—	—	—	—	—	—
219	155.12	158.82	162.47	169.62	176.58	183.33	193.10	202.41	208.38	—	—	—	—	—	—
245	176.92	181.26	185.55	193.99	202.22	210.26	221.95	233.25	240.44	—	—	—	—	—	—
278	200.40	205.43	210.41	220.23	229.85	239.27	253.03	266.40	274.96	—	—	—	—	—	—
299	222.20	227.87	233.50	244.59	255.49	266.20	281.88	297.10	307.02	335.57	353.62	366.64	375.08	395.30	414.29
325	244.00	250.31	256.53	268.94	281.14	293.13	310.73	327.90	339.10	371.49	392.09	407.04	416.75	440.34	462.28
351	265.80	272.76	279.66	293.32	306.79	320.06	339.59	358.68	371.16	407.40	430.59	447.43	458.43	485.24	510.46
377	287.61	295.20	302.77	317.69	332.44	346.99	368.44	389.45	403.22	442.30	469.06	484.82	500.14	529.98	558.55
402	308.55	316.76	324.92	341.10	357.08	372.86	396.16	419.02	434.01	477.81	506.02	526.66	540.17	573.10	604.79
426	328.69	337.49	346.27	363.61	380.77	397.74	422.82	447.46	463.64	510.97	541.57	560.47	578.68	614.56	649.21
450	348.79	358.19	367.53	386.08	404.42	422.56	449.43	475.84	493.20	544.10	577.04	601.24	617.12	655.96	693.56
(465)	361.37	371.13	380.85	400.13	419.22	438.11	466.07	493.59	511.70	564.83	599.24	624.54	641.16	681.84	721.31
480	273.94	384.08	394.17	414.19	436.01	453.64	482.72	511.35	530.19	585.53	621.43	632.31	665.20	707.74	749.05
500	390.71	401.34	411.92	432.93	453.74	474.35	504.91	535.02	554.85	613.15	651.02	678.91	697.26	742.27	786.04
530	415.87	427.23	438.55	461.04	483.34	505.42	538.20	570.53	591.84	654.58	695.41	725.52	745.35	794.05	841.52
(550)	432.64	444.30	456.31	479.79	503.06	526.15	560.40	594.21	616.50	682.19	725.00	756.59	777.41	828.58	878.51
560	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
630	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：①上表中带括号的规格，不推荐使用。

②热轧钢管的通常长度为 3～12.5 mm。

③标记举例：用 10 号钢制造的外径为 76 mm、壁厚为 3.5 mm的热轧钢管，直径和壁厚为普通级精确度，长度为 3000 mm 倍尺，其标记为，钢管 10－76×3.5×3000 倍－YB 231－70。

表 3.1.3-27

冷拔（冷轧）无缝钢管品种

外径 (mm)	壁厚 (mm)															
	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8
	理论质量 (kg/m)															
5	0.0292	0.0348	0.0454	0.055	0.065	0.083	0.099	0.112	0.124	0.129	0.134	—	—	—	—	—
6	0.0354	0.0421	0.055	0.068	0.080	0.103	0.123	0.142	0.159	0.166	0.174	0.186	0.197	—	—	—
7	0.0416	0.0496	0.065	0.080	0.095	0.122	0.148	0.172	0.193	0.203	0.213	0.230	0.247	0.260	0.277	—
8	0.0477	0.057	0.075	0.092	0.110	0.142	0.173	0.202	0.227	0.240	0.253	0.275	0.296	0.315	0.339	—
9	0.054	0.064	0.085	0.105	0.125	0.162	0.197	0.231	0.262	0.277	0.292	0.319	0.345	0.369	0.401	0.427
10	0.060	0.072	0.095	0.117	0.139	0.182	0.222	0.261	0.296	0.314	0.332	0.363	0.395	0.423	0.462	0.496
11	0.066	0.079	0.105	0.129	0.154	0.201	0.247	0.290	0.331	0.351	0.371	0.407	0.444	0.477	0.524	0.566
12	0.072	0.087	0.115	0.142	0.169	0.221	0.271	0.320	0.365	0.388	0.411	0.452	0.493	0.532	0.586	0.635
(13)	0.079	0.094	0.124	0.154	0.184	0.241	0.296	0.349	0.400	0.425	0.451	0.496	0.543	0.585	0.647	0.703
14	0.085	0.101	0.134	0.166	0.199	0.260	0.321	0.379	0.434	0.462	0.490	0.541	0.592	0.640	0.709	0.772
(15)	0.091	0.109	0.144	0.179	0.214	0.280	0.345	0.409	0.468	0.499	0.529	0.585	0.641	0.694	0.771	0.841
16	0.097	0.116	0.154	0.191	0.228	0.300	0.370	0.438	0.503	0.536	0.568	0.629	0.691	0.747	0.832	0.91
(17)	0.103	0.124	0.164	0.203	0.244	0.320	0.395	0.468	0.537	0.573	0.608	0.674	0.740	0.802	0.894	0.98
18	0.109	0.131	0.174	0.216	0.258	0.340	0.419	0.497	0.572	0.610	0.647	0.717	0.789	0.856	0.956	1.05
(19)	0.115	0.138	0.183	0.228	0.274	0.359	0.444	0.527	0.606	0.647	0.687	0.762	0.838	0.910	1.02	1.12
20	0.122	0.146	0.193	0.240	0.288	0.379	0.469	0.556	0.642	0.684	0.726	0.806	0.888	0.965	1.08	1.19
(21)	—	—	0.203	0.253	0.303	0.399	0.493	0.586	0.675	0.721	0.767	0.851	0.937	1.02	1.14	1.26
22	—	—	0.212	0.265	0.318	0.419	0.518	0.616	0.710	0.758	0.806	0.895	0.986	1.07	1.20	1.33
(23)	—	—	0.222	0.277	0.333	0.438	0.543	0.645	0.745	0.795	0.846	0.940	1.04	1.13	1.26	1.39
(24)	—	—	0.236	0.290	0.347	0.458	0.567	0.674	0.779	0.832	0.885	0.984	1.09	1.18	1.33	1.46
25	—	—	0.242	0.302	0.363	0.478	0.592	0.703	0.813	0.869	0.925	1.03	1.13	1.24	1.39	1.53
(27)	—	—	0.262	0.327	0.392	0.516	0.641	0.762	0.882	0.943	1.00	1.12	1.23	1.34	1.51	1.67
28	—	—	0.272	0.340	0.406	0.536	0.666	0.792	0.916	0.98	1.04	1.16	1.28	1.40	1.57	1.74
29	—	—	0.282	0.352	0.418	0.553	0.691	0.823	0.951	1.02	1.076	1.22	1.33	1.47	1.63	1.83
30	—	—	0.292	0.364	0.436	0.576	0.715	0.851	0.986	1.05	1.12	1.25	1.38	1.51	1.70	1.88
32	—	—	0.311	0.389	0.466	0.615	0.765	0.910	1.053	1.13	1.20	1.34	1.48	1.62	1.82	2.02
34	—	—	0.331	0.413	0.496	0.655	0.814	0.968	1.122	1.20	1.28	1.43	1.58	1.72	1.94	2.15
(35)	—	—	0.341	0.426	0.510	0.675	0.838	0.998	1.159	1.24	1.32	1.47	1.63	1.78	2.00	2.22
36	—	—	0.350	0.438	0.525	0.695	0.863	1.027	1.192	1.28	1.36	1.52	1.68	1.83	2.07	2.29
38	—	—	0.370	0.464	0.555	0.734	0.912	1.087	1.26	1.35	1.44	1.61	1.78	1.94	2.19	2.43
40	—	—	0.390	0.494	0.585	0.774	0.962	1.146	1.33	1.42	1.52	1.69	1.87	2.05	2.31	2.56
42	—	—	—	—	—	—	1.010	1.208	1.41	1.50	1.60	1.79	1.97	2.16	2.44	2.70
44.5	—	—	—	—	—	—	1.070	1.281	1.48	1.59	1.65	1.8[illegible]	2.10	2.29	2.59	2.89
45	—	—	—	—	—	—	1.090	1.295	1.51	1.61	1.71	1.91	2.12	2.32	2.62	2.91
48	—	—	—	—	—	—	1.160	1.382	1.61	1.72	1.83	2.05	2.27	2.48	2.81	3.11

续上表

外 径 (mm)	壁 厚 (mm)																	
	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9	9.5	10	11	12
	理 论 质 量 (kg/m)																	
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	0.518	0.536	0.561	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	0.592	0.615	0.647	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0.666	0.694	0.734	0.789	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
(13)	0.740	0.774	0.820	0.888	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	0.814	0.852	0.906	0.986	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(15)	0.888	0.932	0.993	1.09	1.17	1.23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	0.962	1.01	1.08	1.18	1.28	1.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(17)	1.04	1.09	1.17	1.28	1.39	1.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	1.11	1.17	1.25	1.38	1.50	1.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(19)	1.18	1.25	1.34	1.48	1.61	1.73	1.54	1.92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	1.26	1.33	1.42	1.58	1.72	1.85	1.97	2.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(21)	1.33	1.41	1.51	1.68	1.83	1.97	2.10	2.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	1.41	1.49	1.60	1.77	1.94	2.10	2.24	2.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(23)	1.48	1.57	1.68	1.87	2.05	2.22	2.37	2.52	—	—	—	—	—	—	—	—		
(24)	1.55	1.64	1.77	1.97	2.16	2.34	2.51	2.66	2.81	2.93	—	—	—	—	—	—	—	—
25	1.63	1.72	1.86	2.07	2.28	2.47	2.64	2.81	2.97	3.11	—	—	—	—	—	—	—	—
(27)	1.78	1.88	2.03	2.27	2.50	2.71	2.92	3.11	3.29	3.45	—	—	—	—	—	—	—	—
28	1.85	1.96	2.11	2.37	2.61	2.84	3.05	3.26	3.45	3.68	—	—	—	—	—	—	—	—
29	1.92	2.02	2.20	2.47	2.72	2.96	3.19	3.40	3.61	3.80	3.98	—	—	—	—	—	—	—
30	2.00	2.12	2.29	2.56	2.83	3.08	3.32	3.55	3.77	3.97	4.16	4.34	—	—	—	—	—	—
32	2.15	2.28	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.09	4.32	4.53	4.74	—	—	—	—	—	—
34	2.29	2.43	2.63	2.96	3.27	3.58	3.87	4.14	4.41	4.66	4.90	5.13	—	—	—	—	—	—
(35)	2.37	2.51	2.72	3.06	3.38	3.70	4.00	4.29	4.57	4.83	5.09	5.33	—	—	—	—	—	—
36	2.44	2.59	2.81	3.16	3.50	3.82	4.14	4.44	4.73	5.01	5.27	5.52	—	—	—	—	—	—
38	2.59	2.75	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.05	5.35	5.64	5.92	6.18	6.44	—	—	—	—
40	2.74	2.91	3.15	3.55	3.94	4.32	4.68	5.03	5.37	5.70	6.01	6.31	6.60	6.88	—	—	—	—
42	2.89	3.07	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	5.69	6.04	6.38	6.71	7.02	7.32	—	—	—	—
44.5	3.07	3.25	3.54	4.00	4.44	4.87	5.29	5.70	6.09	6.47	6.84	7.20	7.55	7.88	—	—	—	—
45	3.11	3.31	3.58	4.04	4.49	4.93	5.36	5.77	6.17	6.56	6.94	7.30	7.65	7.99	8.32	8.63	—	—
48	3.33	3.54	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	6.65	7.08	7.49	7.89	8.28	8.66	9.02	9.37	—	—

续上表

外 径 (mm)	壁厚 (mm)																					
	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0
	理论质量 (kg/m)																					
50	—	—	—	—	—	—	1.21	1.44	1.68	1.79	1.91	2.14	2.37	2.59	2.93	3.25	3.48	3.70	4.01	4.54	5.05	5.55
(51)	—	—	—	—	—	—	1.23	1.47	1.71	1.83	1.96	2.18	2.42	2.64	2.99	3.32	3.55	3.79	4.10	4.64	5.16	5.67
53	—	—	—	—	—	—	1.28	1.53	1.78	1.91	2.03	2.27	2.52	2.76	3.11	3.46	3.70	3.94	4.27	4.83	5.38	5.92
(54)	—	—	—	—	—	—	1.31	1.59	1.82	1.94	2.07	2.31	2.56	2.81	3.18	3.53	3.77	4.02	4.36	4.93	5.49	6.04
56	—	—	—	—	—	—	1.36	1.62	1.89	2.02	2.15	2.40	2.66	2.92	3.30	3.66	3.92	4.17	4.53	5.13	5.71	6.29
(57)	—	—	—	—	—	—	1.38	1.65	1.92	2.05	2.18	2.45	2.71	2.97	3.36	3.74	4.00	4.25	4.62	5.23	5.83	6.41
60	—	—	—	—	—	—	1.46	1.74	2.02	2.16	2.31	2.58	2.86	3.13	3.55	3.94	4.22	4.49	4.88	5.52	6.16	6.78
63	—	—	—	—	—	—	1.53	1.83	2.13	2.27	2.42	2.71	3.01	3.30	3.72	4.15	4.44	4.73	5.13	5.81	6.49	7.14
65	—	—	—	—	—	—	1.58	1.89	2.20	2.35	2.50	2.80	3.11	3.40	3.85	4.29	4.59	4.89	5.31	6.02	6.71	7.40
(68)	—	—	—	—	—	—	1.65	1.98	2.30	2.46	2.62	2.93	3.26	3.57	4.04	4.49	4.81	5.12	5.57	6.31	7.05	7.77
70	—	—	—	—	—	—	1.70	2.03	2.37	2.53	2.70	3.02	3.35	3.68	4.16	4.63	4.96	5.28	5.74	6.51	7.27	8.01
(73)	—	—	—	—	—	—	1.78	2.12	2.47	2.64	2.82	3.16	3.50	3.84	4.35	4.84	5.18	5.52	6.00	6.18	7.60	8.38
75	—	—	—	—	—	—	1.82	2.18	2.54	2.71	2.90	3.24	3.60	3.95	4.46	4.97	5.32	5.68	6.17	7.00	7.82	8.62
(76)	—	—	—	—	—	—	1.85	2.21	2.57	2.76	2.94	3.29	3.65	4.00	4.53	5.05	5.40	5.75	6.26	7.10	7.93	8.75
80	—	—	—	—	—	—	—	—	2.71	2.90	3.09	3.47	3.84	4.22	4.77	5.32	5.69	6.07	6.60	7.49	8.37	9.24
(83)	—	—	—	—	—	—	—	—	2.82	3.02	3.21	3.60	4.00	4.37	4.96	5.52	5.92	6.31	6.86	7.79	8.71	9.62
85	—	—	—	—	—	—	—	—	2.88	3.08	3.29	3.69	4.09	4.48	5.08	5.66	6.06	6.46	7.04	7.98	8.93	9.86
(89)	—	—	—	—	—	—	—	—	3.02	3.24	3.45	3.86	4.29	4.70	5.33	5.94	6.36	6.77	7.38	8.38	9.38	10.38
90	—	—	—	—	—	—	—	—	3.055	3.27	3.49	3.91	4.34	4.76	5.39	6.01	6.43	6.86	7.47	8.47	9.49	10.47
95	—	—	—	—	—	—	—	—	3.21	3.46	3.68	4.13	4.59	5.02	5.70	6.36	6.81	7.26	7.90	8.98	10.04	11.10
100	—	—	—	—	—	—	—	—	3.40	3.64	3.88	4.35	4.83	5.30	6.00	6.70	7.17	7.65	8.32	9.46	10.59	11.71
(102)	—	—	—	—	—	—	—	—	3.46	3.73	3.97	4.45	4.93	5.40	6.13	6.84	7.32	7.81	8.50	9.67	10.82	11.96
(108)	—	—	—	—	—	—	—	—	3.67	3.95	4.21	4.72	5.23	5.74	6.50	7.25	7.77	8.29	9.02	10.26	11.49	12.70
110	—	—	—	—	—	—	—	—	3.74	4.03	4.28	4.81	5.32	5.84	6.62	7.39	7.92	8.43	9.19	10.46	11.70	12.93
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.36	4.66	5.25	5.83	6.38	7.24	8.07	8.66	9.22	10.06	11.44	12.93	14.30
125	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.46	6.06	6.64	7.54	8.42	9.02	9.61	10.50	11.91	13.37	14.80
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.86	8.78	9.40	10.00	10.92	12.43	13.92	15.48	
(133)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.05	8.98	9.59	10.25	11.18	12.75	14.26	15.75	
140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.11	10.79	11.80	13.42	15.05	16.65
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.85	11.52	12.65	14.39	16.11	17.85
160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.53	15.38	17.25	19.09
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.31	16.31	18.35	20.30
180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15.20	17.30	19.50	21.59
190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18.29	20.60	22.80
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19.67	21.65	24.00
50	6.04		6.51	6.97	7.42	7.86	8.29	8.70	9.10	9.49	9.86	10.59	11.25									
(51)	6.17		6.66	7.13	7.60	8.05	8.48	8.91	9.32	9.72	10.11	10.85	11.54									
53	6.44		6.95	7.45	7.94	8.42	8.88	9.33	9.77	10.19	10.60	11.39	12.13									

续上表

外 径 mm	壁 厚 (mm)															
	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14		
	理 论 质 量(kg/m)															
(54)	6.58	7.10	7.61	8.11	8.60	9.08	9.54	9.99	10.43	10.85	11.67	12.43				
56	6.85	7.40	7.93	8.40	8.97	9.47	9.96	10.43	10.90	11.34	12.21	13.02				
(57)	6.99	7.55	8.10	8.63	9.16	9.67	10.17	10.65	11.13	11.59	12..48	13.32	14.11	—		
60	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.26	10.80	11.32	11.83	12.33	13.29	14.21	15.07	15.88		
63	7.77	8.41	9.04	9.57	10.23	10.81	11.40	11.96	12.49	13.05	14.07	15.09				
65	8.07	8.73	9.38	10.01	10.65	11.25	11.84	12.43	13.00	13.56	14.65	15.68				
(68)	8.48	9.17	9.86	10.53	11.19	11.84	12.47	13.10	13.71	14.30	15.46	16.57	17.53	18.64		
70	8.75	9.47	10.18	10.88	11.56	12.23	12.89	13.54	14.17	14.80	16.01	17.16	18.27	19.33		
(73)	9.16	9.91	10.66	11.39	12.11	12.82	13.52	14.21	14.88	15.54	16.82	18.05	19.24	20.37		
75	9.41	10.18	10.96	11.71	12.48	13.17	13.91	14.61	15.30	15.99	17.31	18.65				
(76)	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42	14.15	14.87	15.58	16.28	17.63	18.94	20.20	21.41		
80	10.07	10.91	11.75	12.59	13.39	14.15	14.96	15.71	16.45	17.22	18.66	20.10				
(83)	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80	15.62	16.42	17.22	18.00	19.53	21.01	22.44	23.82		
85	10.75	11.65	12.55	13.45	14.31	15.13	16.01	16.85	17.63	18.45	20.01	21.60				
(89)	11.33	12.28	13.22	14.16	15.07	15.93	16.87	17.76	18.63	19.48	21.16	22.79	24.37	25.89		
90	11.42	12.39	13.35	14.31	15.22	16.11	17.05	17.95	18.79	19.67	21.43	23.08				
95	12.14	13.17	14.19	15.19	16.18	17.16	18.13	19.09	20.03	20.96	22.79	24.56				
100	12.77	13.87	14.95	16.03	17.09	18.09	19.15	20.15	21.15	22.19	24.14	26.04				
(102)	13.09	14.21	15.31	16.40	17.48	18.55	19.60	20.64	21.67	22.69	24.69	26.63				
(108)	13.90	15.09	16.27	17.44	18.59	19.73	20.86	21.97	23.08	24.17	26.31	28.41				
110	14.19	15.40	16.60	17.75	19.00	20.08	21.30	22.50	23.54	24.70	26.85	29.00				
120	15.51	16.89	18.20	19.50	20.85	22.10	23.40	24.70	25.89	27.20	29.57	31.96				
125	16.15	17.55	19.02	20.35	21.73	23.08	24.42	25.75	27.06	28.36	30.92	33.44				
130	16.88	18.35	19.80	21.20	22.70	24.10	25.50	26.90	28.23	29.70	32.27	34.92				
(133)	17.29	18.79	20.28	21.75	23.21	24.66	26.10	27.52	28.93	30.33	33.10	35.81				
140	18.24	19.83	21.40	22.96	24.51	26.04	27.57	29.08	30.57	32.06	34.99	37.88				
150	19.55	21.25	23.00	24.68	26.36	28.01	29.66	31.29	32.91	34.52	37.71	40.84				
160	20.96	22.79	24.60	26.41	28.20	29.99	31.76	33.51	35.26	36.99	40.42	43.80				
170	22.31	24.27	26.21	28.14	30.05	31.96	33.85	35.73	37.60	39.46	43.13	46.76				
180	23.67	25.75	27.81	29.87	31.91	33.93	35.95	37.95	39.95	41.92	45.85	49.72				
190	25.02	27.22	29.41	31.59	33.75	35.90	38.04	40.17	42.28	44.39	48.56	52.67				
200	26.38	28.70	31.02	33.32	35.60	37.88	40.14	42.39	44.63	46.85	51.27	55.63				

注：①上表中带括号的规格，不推荐使用。

②经供需双方协议可制造上表规定以外的其它尺寸的钢管

③钢管的理论质量P（kg/m）（钢管相对密度为7.85）的计算公式为．$P=0.02466S(D-S)$

式中：D——钢管的公称外径；mm；

S——钢管的公称壁厚；mm。

④冷拔（冷轧）钢管的通常长度：

壁厚≤1 mm，其长度为1.5～7 m；

壁厚＞1 mm，其长度为1.5～9 m。

⑤标记举例：用10号钢制造的外径为76 mm，壁厚为3.5 mm的钢管。

冷拔钢管“拔”，直径为高级精确度“高”，壁厚为普通级精确度，长度为5000 mm（定尺长度）：

钢管拔10-76高×3.5×5000-YB 231-70。

无缝钢管钢号、化学成分及机械性能见表 3.1.3-28（摘自YB 231—70)。

3.1.3-28 **无缝钢管的钢号、化学成分及机械性能**

钢号	化学成分	机械性能			交货状态
		抗拉强度 σ_r MPa	屈服强度 σ_s MPa	伸长率 δ_s(%)	
		不小于			
10 15 20 25 30 35 40 45 50 09 MnV 16 Mn 15 MnV	按GB 699—65（优质碳素结构钢）的规定和YB 13—69（普通低合金结构钢）的规定	340 380 400 460 500 520 560 600 630 (440) (520) (540)	210 230 250 280 290 310 320 340 360 (300) (350) (400)	24 22 20 19 18 17 15 14 12 (22) (21) (18)	热轧管为热轧状态，冷拔管为热处理状态（如用户要求冷拔管不热处理时，不做机械性能检查）
A 2 AJ 2 A 3 AS 3 AJ 3 A 4 AS 4 AJ 4 A 5 AS 5 AJ 5 A 6 AS 6 AJ 6	按GB 700-65(普通碳素钢)的甲类钢制造，但保证含硫量不超过0.055%；含磷量不超过0.045%	340 380 420 500 600	220 240 260 280 310	24 22 20 17 14	热轧管为热轧状态，冷拔管为热处理状态
合金结构钢钢管	按YB 6-71 的规定				同A 2 钢

4.2 低中压锅炉用无缝钢管

低中压锅炉用无缝钢管尺寸见表 3.1.3-29。

表 3.1.3-29 低中压锅炉用无缝钢管尺寸（mm）（摘自GB3087—82）

壁厚 / 直径	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0
10	×	×	×																										
12	×	×	×																										
14		×	×	×																									
16		×	×	×																									
17		×	×	×																									
18		×	×	×																									
19		×	×	×																									
20		×	×	×																									
22		×	×	×	×	×																							
24		×	×	×	×	×																							
25		×	×	×	×	×																							
29			×	×	×	×																							
30			×	×	×	×																							
32			×	×	×	×																							
35			×	×	×	×																							
38			×	×	×	×																							
40			×	×	×	×																							
42			×	×	×	×	×	×																					
45			×	×	×	×	×	×																					
48			×	×	×	×	×	×																					
51			×	×	×	×	×	×																					

续上表

直径＼壁厚	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0
57				×	×	×	×	×																					
60				×	×	×	×	×																					
63.5				×	×	×	×	×																					
70				×	×	×	×	×	×																				
76					×	×	×	×	×	×	×																		
83					×	×	×	×	×	×	×																		
89						×	×	×	×	×	×																		
102						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
108						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
114						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
121						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
127						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
133						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×								
159							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
168							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
194							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
219									×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
245									×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
273										×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
325											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
377													×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
426														×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

表 3.1.3-30　　热轧钢管尺寸①

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)																
	26	28	30	32	(34)	36	38	40	(42)	45	(48)	50	56	60	63	(65)	70
	理论质量 (kg/m)																
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
102	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
108	52.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
121	60.91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
133	68.60	72.50	76.20	79.70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续上表

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)																
	26	28	30	32	(34)	36	38	40	(42)	45	(48)	50	56	60	63	(65)	70
	理论质量 (kg/m)																
146	76.94	81.48	85.82	89.96	93.91	97.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
159	85.27	90.45	95.43	100.22	104.81	109.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
168	91.04	96.67	102.09	107.32	112.35	117.18	121.82	126.26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
194	107.71	114.62	121.33	127.84	134.15	140.27	146.18	151.91	157.43	165.35	—	—	—	—	—	—	—
219	123.74	131.88	139.82	147.57	155.11	162.46	169.61	176.57	183.32	193.09	202.41	208.38	—	—	—	—	—
245	140.41	149.83	159.06	168.08	176.91	185.54	193.98	202.21	210.25	221.94	233.18	240.44	—	—	—	—	—
273	158.37	169.17	179.77	190.18	200.39	210.40	220.21	229.83	239.25	253.01	266.33	274.96	—	—	—	—	—
299	175.04	187.12	199.01	210.70	222.19	233.48	244.58	255.48	266.18	281.86	297.10	307.02	335.57	353.62	—	—	—
325	191.71	205.07	218.24	231.21	243.99	256.56	268.94	281.12	293.11	310.72	327.88	339.07	371.48	392.09	—	—	—
351	208.38	223.03	237.48	251.73	265.79	279.64	293.31	306.77	320.04	339.57	358.66	371.13	407.38	430.56	—	—	—
377	225.05	240.98	256.71	272.25	287.58	302.73	317.67	332.42	346.97	368.42	389.43	403.19	443.29	469.03	487.82	500.10	529.94
426	256.46	274.81	292.96	310.91	328.67	346.23	363.59	380.75	397.72	422.80	447.43	463.61	510.96	541.53	563.95	578.65	614.53
450	271.85	291.38	310.72	329.85	348.79	367.53	386.08	404.42	422.57	449.43	475.84	493.20	544.10	577.04	601.24	617.12	655.96
480	291.09	312.10	332.91	353.53	373.94	394.17	414.19	434.02	453.65	482.72	511.35	530.19	585.53	621.43	647.84	665.20	707.74
500	303.91	325.91	347.71	369.31	390.71	411.92	432.93	453.74	474.36	504.91	535.02	554.85	613.15	651.02	678.91	697.26	742.27
530	323.14	346.62	369.90	392.98	415.87	438.55	461.04	483.34	505.43	538.20	570.53	591.84	654.57	695.41	725.52	745.35	794.05

续上表

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)														
	9.0	10	11	12	13	14	(15)	16	(17)	18	(19)	20	22	(24)	25
	理论质量 (kg/m)														
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
51	9.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
57	10.65	11.59	12.48	13.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	11.32	12.33	13.29	14.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
76	14.87	16.28	17.63	18.94	20.20	21.40	22.56	23.67	24.73	25.74	26	—	—	—	—
83	16.42	18.00	19.53	21.01	22.44	23.82	25.15	26.44	27.67	28.85	29.99	31.07	—	—	—
89	17.76	19.48	21.16	22.79	24.36	25.89	27.37	28.80	30.18	31.52	32.80	34.03	—	—	—
102	20.64	22.69	24.68	26.63	28.53	30.38	32.18	33.93	35.63	37.29	38.89	40.44	43.40	—	—
108	21.97	24.17	26.31	28.41	30.46	32.45	34.40	36.30	38.15	39.95	41.70	43.40	46.66	49.71	51.17
121	24.86	27.37	29.84	32.26	34.62	36.94	39.21	41.43	43.60	45.72	47.79	49.81	53.71	57.41	59.18
133	27.52	30.33	33.09	35.81	38.47	41.08	43.65	46.16	48.63	51.05	53.41	55.73	60.22	64.51	66.58

续上表

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)														
	9.0	10	11	12	13	14	(15)	16	(17)	18	(19)	20	22	(24)	25
	理论质量 (kg/m)														
146	30.41	33.54	36.62	39.65	42.64	45.57	48.46	51.29	54.08	56.82	59.50	62.14	67.27	72.20	74.60
159	33.29	36.74	40.15	43.50	46.80	50.06	53.27	56.42	59.53	62.59	65.60	68.55	74.33	79.90	82.61
168	35.29	38.96	42.59	46.16	49.69	53.17	56.59	59.97	63.30	66.58	69.81	72.99	79.21	85.22	88.16
194	41.06	45.37	49.64	53.86	58.02	62.14	66.21	70.23	74.20	78.12	81.99	85.82	93.31	100.61	104.19
219	46.61	51.54	56.42	61.26	66.04	70.77	75.46	80.10	84.68	89.22	93.71	98.15	106.88	115.41	119.60
245	52.38	57.95	63.47	68.95	74.37	79.75	85.08	90.35	95.58	100.76	105.89	110.97	120.98	130.80	135.63
273	58.59	64.86	71.07	77.24	83.35	89.42	95.43	101.40	107.32	113.19	119.01	124.78	136.17	147.37	152.89
299	64.36	71.27	78.12	84.93	91.69	98.39	105.05	111.66	118.22	124.73	131.19	137.60	150.28	162.76	168.92
325	—	—	—	—	100.02	107.37	114.67	121.92	129.12	136.27	143.37	150.43	164.38	178.14	184.95
351	—	—	—	—	108.36	116.35	124.29	132.18	140.02	147.81	155.56	163.25	178.49	193.53	200.98
377	—	—	—	—	116.69	125.32	133.90	142.44	150.92	159.35	167.74	176.07	192.59	208.92	217.01
426	—	—	—	—	—	142.24	152.03	161.77	171.46	181.10	190.70	200.24	219.18	237.92	247.22
450	—	—	—	—	—	150.52	160.91	171.24	181.52	191.76	201.94	212.08	232.20	252.12	262.01
480	—	—	—	—	—	160.88	172.00	183.08	194.10	205.07	216.00	226.87	248.47	269.88	280.51
500	—	—	—	—	—	167.79	179.40	190.97	202.48	213.95	225.37	236.74	259.32	281.72	292.84
530					—	178.14	190.50	202.80	215.06	227.27	239.42	251.53	275.60	299.47	311.33

续上表

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)														
	2.0	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	(6.5)	7.0	(7.5)	8.0
	理论质量 (kg/m)														
22	0.986	1.20	1.33	1.41	1.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	1.13	1.39	1.53	1.63	1.72	1.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	1.57	1.74	1.85	1.96	2.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	2.02	2.15	2.27	2.46	2.76	3.05	3.33	—	—	—	—	—	—
38	—	—	2.43	2.59	2.75	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	—	—	—	—	—
42	—	—	2.71	2.89	3.06	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33				
48	—	—	3.12	3.33	3.54	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	6.65	7.08	—	—
51	—	—	3.33	3.55	3.77	4.10	4.64	5.16	5.67	6.17	6.66	7.13	7.60	8.05	8.48
57	—	—	—	—	—	4.62	5.23	5.83	6.41	6.98	7.55	8.09	8.63	9.16	9.67
60	—	—	—	—	—	4.88	5.52	6.16	6.78	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.26
76	—	—	—	—	—	6.26	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42
83	—	—	—	—	—	—	7.79	8.71	9.62	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80
89	—	—	—	—	—	—	8.38	9.38	10.36	11.33	12.28	13.22	14.15	15.07	15.98
102	—	—	—	—	—	—	—	10.82	11.96	13.09	14.20	15.31	16.40	17.48	18.54
108	—	—	—	—	—	—	—	11.49	12.70	13.90	15.09	16.27	17.43	18.59	19.73
121	—	—	—	—	—	—	—	—	14.30	15.67	17.02	18.35	19.68	20.99	22.29
133	—	—	—	—	—	—	—	—	15.78	17.29	18.79	20.28	21.75	23.21	24.66

续上表

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)														
	2.0	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	(6.5)	7.0	(7.5)	8.0
	理论质量 (kg/m)														
146	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20.71	22.36	23.99	25.62	27.22
159	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22.64	24.44	26.24	28.02	29.79
168	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25.89	27.79	29.68	31.56
194	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32.28	34.49	36.69
219	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39.12	41.63
245	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
273	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
299	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
325	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
351	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
377	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
426	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
480	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
530	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

① 括号内的尺寸不推荐使用。

表 3.1.3-31

冷拔(冷轧)钢管尺寸

公称外径 (mm)	公称壁厚 (mm)																				
	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	10	11	12	13
	理论质量 (kg/m)																				
10	0.395	0.423	0.462	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0.493	0.532	0.586	0.635	0.666	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	0.690	0.749	0.832	0.911	0.962	1.01	1.08	1.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
22	0.986	1.07	1.20	1.33	1.41	1.48	1.60	1.78	1.94	2.10	2.24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	1.13	1.24	1.39	1.53	1.63	1.72	1.86	2.07	2.27	2.47	2.64	2.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	1.28	1.40	1.57	1.74	1.85	1.96	2.11	2.37	2.61	2.84	3.05	3.26	3.45	3.62	—	—	—	—	—	—	—
32	1.48	1.62	1.82	2.02	2.15	2.27	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.09	4.32	4.53	4.73	—	—	—	—	—
38	1.78	1.94	2.19	2.43	2.59	2.75	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.73	5.05	5.35	5.64	5.92	6.44	—	—	—	—
42	—	—	2.44	2.71	2.89	3.06	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	5.69	6.04	6.38	6.71	7.32	—	—	—	—
48	—	—	2.80	3.12	3.33	3.54	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	6.65	7.08	7.49	7.89	8.66	9.37	—	—	—
51	—	—	2.99	3.33	3.55	3.77	4.10	4.64	5.16	5.67	6.17	6.66	7.13	7.60	8.05	8.48	9.32	10.11	10.85	11.54	
57	—	—	3.36	3.74	3.99	4.25	4.62	5.23	5.83	6.41	6.98	7.55	8.09	8.63	9.16	9.67	10.65	11.59	12.48	13.32	
60	—	—	—	—	4.22	4.48	4.88	5.52	6.16	6.78	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.26	11.32	12.33	13.29	14.20	—
63	—	—	—	—	4.44	4.72	5.14	5.82	6.49	7.15	7.80	8.43	9.06	9.67	10.26	10.85	11.98	13.07	14.11	15.09	—
70	—	—	—	—	4.96	5.27	5.74	6.51	7.27	8.01	8.75	9.47	10.18	10.88	11.56	12.23	13.54	14.80	16.00	17.16	18.27
76	—	—	—	—	—	—	—	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42	14.87	16.28	17.63	18.94	20.20
83	—	—	—	—	—	—	—	7.79	8.71	9.62	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80	16.42	18.00	19.53	21.01	22.44
89	—	—	—	—	—	—	—	8.38	9.38	10.36	11.33	12.28	13.22	14.15	15.07	15.98	17.76	19.48	21.16	22.79	24.36
102	—	—	—	—	—	—	—	—	10.82	11.96	13.09	14.20	15.31	16.40	17.48	18.54	20.64	22.69	24.68	26.63	—
108	—	—	—	—	—	—	—	—	11.49	12.70	13.90	15.09	16.27	17.43	18.59	19.73	21.97	24.17	26.31	28.41	—

表 3.1.3-32

钢管的钢号及化学成分

钢类	序号	钢号	化学成分(%)													
			C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Nb+Ta	Xt	S	P
															不大于	
优质碳素钢	1	20 G	0.17~0.24	0.35~0.65	0.17~0.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.035	0.035
合金钢	2	12 CrMo	0.08~0.15	0.40~0.70	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.55	—	—	—	—	—	—	—	0.035	0.035
	3	15 CrMo	0.12~0.18	0.40~0.70	0.17~0.37	0.80~1.10	0.40~0.55	—	—	—	—	—	—	—	0.035	0.035
	4	12 Cr 2 Mo	0.08~0.15	0.40~0.70	≤0.50	2.00~2.50	0.90~1.20	—	—	—	—	—	—	—	0.035	0.035
	5	12 Cr 1 MoV	0.08~0.15	0.40~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30	—	—	—	—	—	—	0.035	0.035
	6	12 Cr 2 Mo WVTiB	0.08~0.15	0.45~0.65	0.45~0.75	1.60~2.10	0.50~0.65	0.28~0.42	0.08~0.18	≤0.008	0.30~0.55	—	—	—	0.035	0.035
	7	12 Cr 3 Mo VSiTiB	0.09~0.15	0.50~0.80	0.60~0.90	2.50~3.00	1.00~1.20	0.25~0.35	0.22~0.38	0.005~0.011	—	—	—	—	0.035	0.035
	8	12 MoVWBSiXt	0.08~0.15	0.40~0.70	0.60~0.90	—	0.45~0.65	0.30~0.50	0.06*	电炉 0.008* 平炉 0.01*	0.15~0.40	—	—	0.15*	0.040	0.040
不锈耐热钢	9	1 Cr 19 Ni 9	0.04~0.10	≤2.00	≤1.00	18.00~20.00	—	—	—	—	—	8.00~11.00	—	—	0.030	0.035
	10	1 Cr 19 Ni 11 Nb	0.04~0.10	≤2.00	≤1.00	17.00~20.00	—	—	—	—	—	9.00~13.00	≥8 C% ~1.00%	—	0.030	0.035

注：①*指加入量。

②残余铜含量不大于 0.25%。

③ 20 G钢中，酸溶铝不大于 0.010%，暂不作交货依据，但应填在质量证明书中。

④用纯氧顶吹转炉加炉外精炼制造的钢，氮含量不大于 0.008%。

4.3 锅炉用高压无缝钢管

锅炉用高压无缝钢管的尺寸、钢号、化学成分、热处理制度、机械性能与高温性能分别见表 3.1.3-30～表 3.1.3-36（均摘自GB 5310—85）。

表 3.1.3-33　　**钢管的热处理制度**

序号	钢号	热处理制度
1	20 G	900～930℃正火，热轧管当终轧温度大于或等于 900℃时，可以代替正火
2	12 CrMo	900～930℃正火，670～720℃回火，保温时间 2～3 h
3	15 CrMo	930～960℃正火，680～720℃回火，保温时间 2～3 h
4	12 Cr 2 Mo	正火：900～960℃，回火 700～750℃也可进行：加热至 900～960℃，炉冷至 700℃保温 1 h以上，空冷
5	12 Cr1MoV	980～1020℃正火，保温时间：按壁厚每毫米 1 min，但不少于 20 min 720～760℃回火，保温时间：2～3 h。当壁厚S大于或等于 40 mm应进行调质处理，淬火温度大于或等于 950℃，回火温度 720～760℃，保温 2～3 h
6	12 Cr 2 MoWVTiB	1000～1035℃正火，保温时间：按壁厚每毫米 1.5 min，但不少于 20 min 760～790℃回火，保温时间：3 h
7	12 Cr 3 MoVSiTiB	1040～1090℃正火，保温时间：按壁厚每毫米 1.5 min，但不少于 20 min 720～770℃回火，保温时间：3 h
8	12 MoVWBSiXt	970～1010℃正火，保温时间：按壁厚每毫米 1.5 min，但不少于 20 min 760～780℃回火，保温时间：3 h
9	1 Cr 19 Ni 9	固溶处理：固溶温度≥1040℃
10	1 Cr 19 Ni 11 Nb	固溶处理：热轧(挤、扩)管，固溶温度≥1050℃； 冷拔（轧）管固溶温度≥1095℃

表 3.1.3-34　　**钢管的机械性能**

钢类	序号	钢号	纵向机械性能				横向机械性能			
			抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	冲击值 α_k (J/cm²)	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	冲击值 α_k (J/cm²)
				不小于			不小于			
优质碳素钢	1	20 G	412～549	245	24	49	402	216	22	39
	2	12 CrMo	412～559	206	21	69				
	3	15 CrMo	441～638	235	21	59	441	226	20	49
	4	12 Cr 2 Mo	450～600	280	20	48(J)(DVM试样)*			18	34(J)(DVM试样)
合金钢	5	12 Cr 1 MoV	471～638	255	21	59	441	255	19	49
	6	12 Cr_2Mo WVTiB	540～736	343	18					
	7	12 Cr_3Mo VSiTiB	608～804	441	16					
	8	12 MoVWBSiXt	540～687	314	18					
不锈耐热钢	9	1 Cr 19 Ni 9	≥520	206	35					
	10	1 Cr 19 Ni 11 Nb	≥520	206	35					

注：①允许一个试样的冲击值比表中规定数值低 9.8 J/cm²，但一组三个试样的算术平均值不小于表中规定值。20 G钢的

横向冲击值不允许降低。

②用 12 Cr 2 Mo钢制造的钢管，当外径不大于 30 mm、壁厚不大于 3 mm时，其屈服强度允许降低 9.8 MPa。

③当壁厚大于 16～40 mm时，屈服强度允许降低 9.8 MPa，壁厚大于 40 mm时，屈服强度允许降低 19.6 MPa。

④要作V型缺口冲击试验，其冲击功值要填在质量证明书中，不作交货依据。

⑤*指V型缺口冲击功。

表 3.1.3-35　　　　各种钢的高温瞬时性能(参考)

序号	钢　号	热处理制度	试验温度(℃)	抗拉加度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 φ (%)	冲击值 α_k (J/cm²)
1	20 G	920～950℃ 正火	250	—	196	—	—	—
			300	—	177	—	—	—
			350	—	157	—	—	—
			400	—	137	—	—	—
			450	—	98	—	—	—
			475	—	69	—	—	—
			500	—	49	—	—	—
2	12 CrMo	—	—	—	—	—	—	—
			—	—	—	—	—	—
			—	—	—	—	—	—
3	15 CrMo	900～920℃ 正火 630～650℃ 回火	400	495	245	23.5	69.5	—
			450	481	245	21.5	74.0	—
			500	441	265	20.0	75.5	—
			550	412	245	21.0	78.5	—
4	12 Cr 2 Mo		200	—	245	—	—	—
			250	—	240	—	—	—
			300	—	230	—	—	—
			350	—	215	—	—	—
			400	—	205	—	—	—
			450	—	195	—	—	—
			500	—	185	—	—	—
5	12 Cr 1 MoV	1000～1020℃ 正火 740℃ 回火 保温 2 h	480	481	334	22.0	75.2	—
			520	455	327	21.9	75.8	—
			560	379	278	24.8	81.0	—
6	12 Cr 2 MoWVTiB	1000～1030℃ 正火 保温 90 min 750～790℃ 回火 保温 3 h	580	363/502	324/343*	13/25.8	80.7/87	—
			600	294/440	198/245*	12/32	80.8/88	—
			620	298/424	221/319*	12.5/32.4	84.1/89.3	—

续上表

7	12 Cr 3 MoVSiTiB	1050～1090℃正火 720～760℃回火 保温 5 h	580	441	0.55 σ_b	16	50	—
			600	373	0.55 σ_b	16	50	—
			620	353	0.55 σ_b	16	50	—
8	12 MoVWBSiXt	970～1010℃正火 保温 45 min 760～780℃回火 保温 3 h	100	647	520/540	15	68/70	221/250
			200	638/647	510/520	13/14	66/69	—
			300	667	490/500	13/16	61/63	—
			400	608	481/490	15/16	72/73	201/214
			500	481/500	412	14/15	78/79	—
			550	441/451	383/392	13	82/83	—
			580	363/392	343/353	10/11	82/83	172/175
			600	353/383	314/334	13/19	82/83	—
			620	343/363	304/324	12/13	81/84	—

表 3.1.3-36 **各种钢高温持久性能**

序　号	钢　号	热处理制度	试验温度 (℃)	蠕变强度 $\sigma_1/10^5$ (MPa)	10 万h持久强度 $\sigma_b/10^5$ (MPa)
1	20 G	920～950℃正火	400	88	135
			450	44	87
			460		77
			470	32	68
			480		57
			500	21	38
2	12 CrMo	920℃正火 680～690℃回火	480	—	196
			510	—	117
			540	—	68
			—	—	—
			—	—	—
			—	—	—
			—	—	—
3	15 CrMo	900～920℃正火 630～650℃回火	425	147	—
			450	98，475℃	235
			500	78	108～137
			550	44	49～69
4	12 Cr 2 Mo		450	166	221
			460	155	205
			470	145	188
			480	130	170
			490	116	152

续上表

序　号	钢　号	热处理制度	试验温度(℃)	蠕变强度 $\sigma_1/10^5$ (MPa)	10 万h持久强度 $\sigma_b/10^5$ (MPa)
4	12 Cr 2 Mo		500	103	135
			510	90	113
			520	78	103
			530	68	90
			540	58	78
			550	49	68
			560	41	58
			570	35	51
			580	30	44
			590	26	38
			600	22	34
5	12 Cr 1 MoV	1000～1020℃ 正火 740℃ 回火 保温 2 h	480	186	196
			520	128	157
			560	78	98
			580	59	78
			600	—	59
6	12 Cr 2 MoWVTiB	1000～1030℃ 正火 保温 90 min 750～790℃ 回火 保温 3 h	580	—	123
			600	53～67	109
			620	35～49	64～93
7	12 Cr 3 MoVSiTiB	1050～1090℃ 正火 720～760℃ 回火 保温 5 h	580	77～80	108～116
			600	59～63	92～98
			620	40～43	72～83
			650	—	43
8	12 MoVWBSiXt	970～1010℃ 正火 保温 45 min 760～780℃ 回火 保温 3 h	540	—	137
			580	—	127～170
			600	—	117
			620	—	93
9	1 Cr 19 Ni 9		538	—	101
			566	—	98
			593	—	92
			621	—	79
			649	—	63
			677	—	48
			704	—	38
			732	—	29
			766	—	23

续上表

序　号	钢　号	热处理制度	试验温度（℃）	蠕变强度 $\sigma_1/10^5$（MPa）	10 万h持久强度 $\sigma_b/10^5$（MPa）
10	1 Cr 19 Ni 11 Nb		538	—	130
			566	—	129
			593	—	124
			621	—	108
			649	—	82
			677	—	60
			704	—	45
			732	—	32
			766	—	26

4.4　不锈耐酸无缝钢管

不锈耐酸无缝钢管尺寸、钢号和机械性能见表 3.1.3-37～表 3.1.3-39。

表 3.1.3-37　　钢管的钢号及机械性能

序号	钢　　号	热轧、热挤压		冷拔（轧）	
		抗拉强度 σ_b（MPa）	伸长率 δ_5（%）	抗拉强度 σ_b（MPa）	伸长率 δ_5（%）
		不　小　于			
1	0 Cr 13	273	22	372	22
2	1 Cr 13	392	21	392	21
3	2 Cr 13	412	20	412	20
4	3 Cr 13	—	—		—
5	1 Cr 17 Ni 2	—	—		—
6	1 Cr 25 Ti	441	15	441	17
7	1 Cr 21 Ni 5 Ti	588	20	588	20
8	0 Cr 18 Ni 9 Ti	490	40	510	40
9	00 Cr 18 Ni 10	441	40	480	40
10	1 Cr 18 Ni 9	530	40	530	35
11	1 Cr 18 Ni 9 Ti	540	40	549	40
12	00 Cr 17 Ni 14 Mo 2	480	40	480	40
13	00 Cr 17 Ni 14 Mo 3	480	40	480	40
14	0 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti	510	42	530	35
15	0 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti	510	35	530	35
16	1 Cr 18 Ni 12 Mo 2 Ti	540	35	540	35
17	1 Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti	540	35	540	35
18	1 Cr 23 Ni 18	490	37	530	35
19	1 Cr 18 Ni 11 Nb	510	38	510	38

注：①3 Cr 13、1 Cr 17 Ni 2 压痕直径不小于 3.7 mm，如需方要求机械性能时，由双方协议规定。
②热轧钢管壁厚大于 15 mm时，其抗拉强度允许按表中规定数值降低 19.6 MPa。
③如需方要求不经热处理交货的钢管，其弯曲度、机械性能和晶间腐蚀试验不做检验，需方有特殊要求时，经双方协议并在合同中注明。

表 3.1.3-38

热轧（热挤压）钢管的尺寸(mm)

直径 \ 壁厚	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	25	26	28	30	32	34	35	36	38	40	42	45
54	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																								
56	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																							
57	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
60	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
63	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
65	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
68		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
70		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
73		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
75		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
76		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
80		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
83		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
85		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
89		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
90		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
95		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
100		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×															
102		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×															
108		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×													
114		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×										
121		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×								
127		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																			

续上表

直径＼壁厚	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	25	26	28	30	32	34	35	36	38	40	42	45
133		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
140		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×					
146		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×					
152		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
159		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
168						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
180						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
194						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
200						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
219						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
225						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
250																						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
273																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×					
299																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×								
325																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×									
351																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×									
365																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×										
377																	×	×	×	×	×	×	×	×												
402																	×	×	×	×	×	×	×													
426																	×	×	×	×	×	×														
450																	×	×	×	×																
480																	×																			

表 3.1.3-39　冷拔(轧)钢管的尺寸 (mm)

壁厚 / 直径	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
6	×	×	×	×	×	×	×	×	×																														
7	×	×	×	×	×	×	×	×	×																														
8	×	×	×	×	×	×	×	×	×																														
9	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																												
10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																												
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																												
12	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																										
13	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																										
14	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																								
15	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																								
16	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																							
17	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																							
18	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																						
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																						
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																						
21	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																					
22	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																					
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																					
24	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																				
25	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																			
27	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																			
28	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																		

续上表

直径 \ 壁厚	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
30	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
32	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
34	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
35	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
36	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
38	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																	
42	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																
45	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
48	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×														
50	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×													
51	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×													
53	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×												
54	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
56	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
57	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
60	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
63							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
65							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
68							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×内	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
70								×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
73											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											

续上表

壁厚 / 外径	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
75											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
76											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×											
80											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
83											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
85											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
89											×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
90													×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
95													×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
100													×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
102															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
108															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
114															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
127															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
133															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
140															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×						
146															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
159															×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
168																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
180																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
194																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
200																	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
																				×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

注：表中的符号“×”表示有产品。

表 3.1.3-40　**钢管的尺寸与理论质量**　（摘自 YB242—63）

外径	壁厚 (mm)																						
mm	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3 2	3.5	3.8	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.5
	钢管的理论质量 (kg/m)																						
(5)	0.055	0.065	0.083	0.099																			
(6)	0.068	0.080	0.103	0.123																			
(7)	0.080	0.095	0.122	0.148																			
(8)	0.092	0.110	0.142	0.173	(0.202)																		
(9)	0.105	0.125	0.162	0.197	0.231																		
10	0.117	0.139	0.182	0.222	(0.261)																		
(11)	0.129	0.154	0.201	0.247	0.290																		
12	0.142	0.169	0.221	0.271	0.320	0.365	(0.388)	0.441															
(13)		0.184	0.241	0.296	0.349	0.400	0.425	0.451															
(14)		0.199	0.260	0.321	0.379	0.434	0.462	0.490															
15		0.214	0.280	0.345	0.409	0.468	(0.499)	0.529															
16		0.228	0.300	0.370	0.438	0.503	(0.536)	0.568															
(17)		0.244	0.320	0.395	0.468	0.537	0.573	0.608															
18		0.258	0.340	0.419	0.497	0.572	(0.610)	0.647	(0.717)	(0.789)													
(19)		0.274	0.359	0.444	0.527	0.606	0.647	0.687	0.762	(0.838)													
20		0.288	0.379	0.469	0.556	0.642	(0.684)	0.726	(0.806)	(0.888)													
(21)				0.493	0.586	0.675	0.721	0.767	0.851	0.937													
22				0.518	0.616	0.710	0.758	0.806	0.895	0.986													
(23)				0.543	0.645	0.745	0.795	0.846	0.940	1.040	1.130	1.260											
24				0.567	0.674	0.779	(0.832)	0.885	(0.984)	(1.090)	(1.180)	(1.330)											
25				0.592	0.703	0.813	0.869	0.925	1.030	1.130	1.240	1.390											
(26)				0.617	0.734	0.849	0.906	0.963	1.074	1.180	1.291	1.450											
(27)				0.641	0.762	0.882	0.943	1.000	1.120	1.230	1.340	1.510											
28				0.666	0.792	0.916	(0.980)	1.040	(1.160)	(1.280)	(1.400)	(1.570)											
29				0.691	0.823	0.951	1.020	1.076	1.220	1.330	1.470	1.640											
30				0.715	0.851	0.986	(1.050)	1.120	(1.260)	(1.380)	(1.510)	(1.700)											
(31)				0.740	0.881	1.021	1.090	1.152	1.296	1.430	1.562	1.760											
32					0.910	1.053	1.130	1.200	1.340	1.480	1.620	1.820											
33					0.941	1.091	1.170	1.238	1.385	1.530	1.671	(1.880)											
(34)					0.968	1.122	1.200	1.280	1.430	1.580	1.720	1.940											
(35)					0.998	1.159	1.240	1.320	1.470	1.630	1.780	2.000											
(36)					1.027	1.192	1.280	1.360	1.520	1.680	1.830	2.070											
(37)					1.059	1.229	1.310	1.396	1.562	1.730	1.887	2.130											
38					1.087	1.260	1.350	1.440	1.610	1.780	1.940	2.190											
(39)						1.29	1.39	1.47	1.65	1.82	1.99	2.26											
40						1.33	1.42	1.52	1.69	1.87	2.05	(2.31)											
(41)						1.36	1.46	1.55	1.74	1.92	2.10	2.37											
42						1.41	1.50	1.60	1.79	1.97	2.16	2.44											

续上表

外径 mm	壁厚 (mm) 0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.5
	钢管的理论质量 (kg/m)																						
43						1.43	1.54	1.63	1.82	2.02	2.21	2.50											
44.5						1.48	1.59	1.65	1.88	2.10	2.29	2.59	2.89	3.07									
45						1.51	1.61	1.71	1.91	2.12	2.32	2.62	2.91	3.11									
(46)						1.54	1.65	1.75	1.96	2.17	2.37	2.68	—	—									
(47)						1.57	1.68	1.79	2.00	2.22	2.43	2.74	—	—									
(48)						1.61	1.72	1.83	2.05	2.27	2.48	2.81	3.11	3.33		3.84							
51						1.71	1.83	1.96	2.18	2.42	2.64	2.99	3.32	3.55	3.79	4.10							
53						1.78	1.91	2.03	2.27	2.51	2.76	3.11	3.46	3.70	3.94	4.27							
(54)						1.82	1.94	2.07	2.31	2.56	2.81	3.18	3.53	3.77	4.02	4.36							
57						1.92	2.05	2.18	2.45	2.71	2.97	3.36	3.74	4.00	4.25	4.62							
60						2.02	2.16	2.31	2.58	2.86	3.13	3.55	3.94	4.22	4.49	4.83							
63.5						2.14	2.29	2.44	2.73	3.03	3.32	3.76	4.19	4.48	4.75	5.18							
70						2.37	2.53	2.70	3.02	3.35	3.68	4.16	4.63	4.96	5.28	5.74				7.88			
76						2.57	2.76	2.94	3.29	3.65	4.00	4.53	5.02	5.40	5.75	6.26	6.76	7.10	7.43	7.93			
83									3.60	4.00	4.37	4.96	5.52	5.92	6.31	6.86	7.42	7.79	8.16	8.71			
89										4.29	4.70	5.33	5.94	6.36	6.77	7.38	7.98	8.38	8.78	9.38	9.96		
95										4.59	5.02	5.70	6.36	6.81	7.26	7.90	8.54	—	—	—	—		
102										4.93	5.40	6.13	6.84	7.32	7.81	8.50	9.20	9.67	10.12	10.82	11.50	11.96	
108														7.77	8.29	9.02	9.76	10.26	—	—	—	—	
114														8.21	8.74	9.54	10.22	10.85	11.37	12.15	12.92	13.44	
121														8.73	9.29	10.14	10.98	11.54	12.09	—	—	—	
127														9.17	9.77	10.66	11.54	12.13	12.71	13.59	14.46	15.04	
133																11.18	12.10	12.73	—	14.62	15.17	15.78	
140																11.78	12.76	13.42	14.06	15.04	16.00	16.65	18.24
152																12.82	13.88	14.60	15.30	16.37	17.42	18.13	19.78

注：①表中括号内的外径或重量的钢管应经过冷拔；外径不大于 63.5 mm，壁厚不大于 2.5 mm的没有括号的钢管经过冷拔或不经过冷拔方法制造；其余的钢管均不经过冷拔方法制造。

②钢管的通常长度：外径≤30 mm 为 2～6 m；外径＞30～70 mm 为 3～10 m；外径＞70 mm 为 4～10 m。

③标记举例：用 10 号钢制造的外径为 25 mm、壁厚为 2 mm的钢管：

(一)外径和壁厚均为普通级精确度，长度为 5000 mm定尺的软钢管“软”：

钢管软 10—25×2×5000—YB 242—63；

(二)外径为高级精确度“高”，壁厚为最高级精确度“最”，长度为 2000 mm 倍尺“倍”的低硬钢管：钢管低硬 10—25 高×2 最×2000 倍—YB 242-63；

(三)外径为最高级精确度“最”，壁厚为普通级精确度的通常长度的硬钢管“硬”：

钢管硬 10—25 最×2×2000～6000—YB 242—63。

5 焊接钢管

5.1 直径 5～152 mm 电焊管

直径为 5～152 mm 的电焊管尺寸、理论质量、牌号和机械性能见表 3.1.3-40、表 3.1.3-41。

表 3.1.3-41 钢管的钢号及机械性能

钢号	软钢管		低硬钢管		硬钢管	
	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_{10}(%)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_{10}(%)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_{10}(%)
	不小于					
08 和 10	314	20	372	12	392	5
15	353	18	402	10	441	4
20	392	17	441	8	490	3
A2和AJ2	333	20	353	12	—	—
A3和AJ3	372	18	392	10	—	—
A4和AJ4	412	17	431	8	—	—

注：如取得需方同意，低硬钢管和硬钢管的抗拉强度可减低到软钢管的规定。

5.2 低压流体输送用焊接钢管（黑铁管）及镀锌焊接钢管（白铁管）

此类钢管主要用于输送水、煤气及取暖系统，也可作结构零件使用。钢管分为镀锌管和不镀锌管（黑管）；带螺纹（锥形和圆柱形螺纹）管和不带螺纹管（光管）；按壁厚又分普通管、加厚管和薄壁管。

钢管长度：无螺纹的黑管为 4～12 m；带螺纹的黑管和镀锌管为 4～9 m。

钢管用易焊接的软钢制造，如B 2、B 3、B 2 F、B 3 F等。

钢管须经过水压试验。普通钢管和薄壁钢管应能承受 1.96 MPa 的压力；加厚钢管应能承受 2.94 MPa 的压力。钢管的尺寸与理论质量见表 3.1.3-42。

表 3.1.3-42 钢管的尺寸及理论质量

公称口径 (mm)	公称口径 (in)	外径 (mm)	普通钢管 壁厚 (mm)	普通钢管 理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	加厚钢管 壁厚 (mm)	加厚钢管 理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	用途
6	$\frac{1}{8}$	10.0	2.00	0.39	2.50	0.46	
8	$\frac{1}{4}$	13.5	2.25	0.62	2.75	0.73	
10	$\frac{3}{8}$	17.0	2.25	0.82	2.75	0.97	
15	$\frac{1}{2}$	21.3	2.75	1.25	3.25	1.45	

续上表

公称口径		外径	普通钢管		加厚钢管		用途
(mm)	(in)	(mm)	壁厚 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度7.85)	壁厚 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度7.85)	
20	$\frac{3}{4}$	26.8	2.75	1.63	3.50	2.01	适用于输送水、煤气、空气、油和取暖蒸汽等一般较低压力流体和其它用途，俗称"水、煤气管"
25	1	33.5	3.25	2.42	4.00	2.91	
32	$1\frac{1}{4}$	42.3	3.25	3.13	4.00	3.78	
40	$1\frac{1}{2}$	48.0	3.50	3.84	4.25	4.58	
50	2	60.0	3.50	4.88	4.50	6.16	
65	$2\frac{1}{2}$	75.5	3.75	6.64	4.50	7.88	
80	3	88.5	4.00	8.34	4.75	9.81	
100	4	114.0	4.00	10.85	5.00	13.44	
125	5	140.0	4.50	15.04	5.50	18.24	
150	6	165.0	4.50	17.81	5.50	21.63	

注：①钢管应按 GB 700-79《普通碳素钢》规定的1、2或3号乙类钢制造，也可采用易焊接的其它软钢制造。
②钢管按壁厚分为普通钢管和加厚钢管，按管端形式分为不带螺纹（光管）和带螺纹钢管。
③钢管长度：不镀锌的（即黑铁管）为4～10 m，镀锌的（即白铁管）为4～9 m。
④钢管应能承受下列规定的水压试验：
普通钢管 1.96 MPa,
加厚钢管 2.94 MPa。

6 钢丝

6.1 一般用途低碳钢丝

一般用途低碳钢丝的直径、机械性能和质量见表3.1.3-43。

表3.1.3-43 一般用途低碳钢丝 (摘自 GB 343—82)

钢丝直径 (mm)	抗拉强度σ_b(MPa) 一般用	抗拉强度σ_b(MPa) 制钉	弯曲试验 (次/180°) 不小于	理论质量 (kg/100 m)	钢丝直径 (mm)	抗拉强度σ_b(MPa) 一般用	抗拉强度σ_b(MPa) 制钉	弯曲试验 (次/180°) 不小于	理论质量 (kg/100 m)
0.16	≤981	--	用打结试验代替，其打结拉力不小于不打结破断拉力的50%	0.0158	1.4	≤1030	785～1226	6	1.21
0.18				0.0200	1.6				1.58
0.20				0.0247	1.8				2.00
0.22				0.0302	2.0	≤981	736～1177		2.47
0.25				0.0381	2.2				3.02
0.28				0.0478	2.5				3.81
0.30				0.0555					
0.35				0.0755	2.8	≤932	687～1128	4	4.78
0.40				0.0987	3.0				5.55
0.45				0.125	3.5				7.43
0.50				0.154	4.0	≤834	588～1030		9.86
0.55				0.186	4.5				12.5
0.60				0.219	5.0				15.4
0.70				0.298	5.5	≤736	539～932		18.5
0.80				0.395	6.0				21.9

续上表

钢丝直径 (mm)	抗拉强度σ_b(MPa)		弯曲试验 (次/180°) 不小于	理论质量 (kg/100 m)	钢丝直径 (mm)	抗拉强度σ_b(MPa)		弯曲试验 (次/180°) 不小于	理论质量 (kg/100 m)
	一般用	制钉				一般用	制钉		
0.90	≤981	883~1324		0.493	7.0	≤637	—	不作	29.8
1.0				0.617	8.0 9.0				38.9 49.3
1.2				0.888	10.0				61.7

注：①钢丝是用 GB 701—65 普通低碳钢热轧圆盘条拉制而成，适用于一般的捆绑、牵拉、镀锌、编织、制钉等用途。

②按交货时热处理状态，钢丝可分为：冷拉钢丝（L）和退火钢丝（T）。

6.2 重要用途低碳钢丝

重要用途低碳钢丝直径、分类和机械性能见表 3.1.3-44。

表 3.1.3-44 **重要用途低碳钢丝** （摘自 3083--82）

钢丝直径 (mm)	抗拉强度σ_b(MPa)		扭转次数 (次/360°) 不少于	弯曲次数 (次/180°) 不少于	理论质量 (kg/100 m)
	光面钢丝	镀锌钢丝			
0.3	≥392	≥363	30	打结拉力试验抗拉强度:(MPa) 光面钢丝>226 镀锌钢丝>186	0.0555
0.4			30		0.0987
0.5			30		0.154
0.6			30		0.219
0.8			30		0.395
1.0			25	22	0.617
1.2			25	18	0.888
1.4			20	14	1.21
1.6			20	12	1.58
1.8			18	12	2.00
2.0			18	10	2.47
2.3			15	10	3.26
2.6			15	8	4.17
3.0			12	10	5.55
3.5			12	10	7.43
4.0			10	8	9.86
4.5			10	8	12.5
5.0			8	6	15.4
6.0			—	—	21.9

注：①钢丝牌号及化学成分应符合 GB 699—65《优质碳素结构钢》规定的低碳钢制成，钢号由制造厂根据技术条件确定，适用加固、捆绑机械制造中重要零、部件。

②钢丝按交货时的表面情况分为：

Ⅰ类 镀锌钢丝（代号Zd）

Ⅱ类 光面钢丝（代号Zg）

表 3.1.3-45、表 3.1.3-46 为镀锌钢丝的锌层质量和牢固性以及钢丝的质量。

表 3.1.3-45　　**镀锌钢丝的锌层质量和牢固性**

公称直径 (mm)	锌层质量 (g/m²)	硫酸铜		缠绕试验直径倍数缠绕 20 圈
		浸置次数不小于	每次浸置时间(s)	
0.3 0.4	5	1	30	
0.5 0.6	8			
0.8	15	1	60	
1.0 1.2 1.4	24			
1.6 1.8 2.0	41	2	60	5
2.3 2.6	59			
3.0 3.5	75			
4.0 4.5	95	3	60	
5.0 6.0	110			

表 3.1.3-46　　**钢 丝 的 质 量**

钢　　丝　　直　　径 (mm)	单　根　质　量，　(kg) 不　小　于
6.0～4.0	20
3.5～1.8	10
1.6～1.2	5
1.0～0.8	1
0.6～0.5	0.5
0.4～0.3	0.3

6.3　一般用途热镀锌低碳钢丝

钢丝用盘条拉制后镀制而成，亦可用光面钢丝镀制。

镀锌钢丝按性能及表面质量分为 I 和II 两组。钢丝的抗拉强度应为 300～500 MPa，延伸率不得低于 10%。但按II组交货的钢丝，其抗拉强度上限允许不超过 550 MPa。

此类钢丝主要用于捆绑、牵拉、编织等。一般用途热镀锌低碳钢丝的直径与性能见表 3.1.3-47。

表 3.1.3-47　　**一般用途热镀锌低碳钢丝**　　（摘自GB3081—82）

钢丝直径 (mm)	抗拉强度 σ_b (N/mm²)		伸长率 δ (%)		理论质量 (kg/100 m)	钢丝直径 (mm)	抗拉强度 σ_b (N/mm²)		伸长率 δ (%)		理论质量 (kg/100 m)
	Ⅰ组	Ⅱ组	Ⅰ组	Ⅱ组			Ⅰ组	Ⅱ组	Ⅰ组	Ⅱ组	
0.20	294～490	294～539	≥12	≥10	0.0247	1.6	294～490	294～539	≥12	≥10	1.58
0.25					0.0381	1.8					2.00
0.30					0.0555	2.0					2.47
0.35					0.0755	2.2					3.02
0.40					0.0987	2.5					3.81
0.45					0.125	2.8					4.78
0.50					0.154	3.0					5.55
0.55					0.186	3.5					7.43
0.60					0.219	4.0					9.86
0.70					0.298	4.5					12.5
0.80					0.395	5.0					15.4
0.90					0.493	5.5					18.5
1.0					0.617	6.0					21.9
1.2					0.888	>6.0					—
1.4					1.21						

注：镀锌钢丝系用 GB 343—82《一般用途低碳钢丝》中的普碳钢冷拉钢丝镀制而成，适用于一般捆绑、牵拉、编织等用途。

6.4 铬钒弹簧钢丝

钢丝应成盘状或条状交货。直径小于 2 mm者，条长不小于 1 m；直径大于 2～9 mm者，其条长不小于 1.5 m；直径大于 9 mm者，条长不应小于 2 m；按盘状交货的钢丝，其长度不应小于 8 m。

钢丝直径大于或等于 2.8 mm者、以抛光、磨光或磨光后冷拉状态交货，钢丝直径小于 2.8 mm者可不予抛光或磨光。

钢丝在缠成弹簧后再进行热处理。铬钒弹簧钢丝的直径、质量、化学成分和机械性能见表 3.1.3-48～表 3.1.3-50。

表 3.1.3-48　　**铬钒弹簧钢丝的直径与质量**　　（摘自GB 5219-85）

直　径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	直　径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	直　径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	直　径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)
0.80	0.00395	2.50	0.0381	4.50	0.125	8.00	0.389
1.00	0.00617	2.80	0.0478	4.80	0.140	8.50	0.440
1.20	0.00888	3.00	0.0555	5.00	0.154	9.00	0.493
1.40	0.0121	3.20	0.0624	5.50	0.1845	9.50	0.549
1.60	0.0158	3.50	0.0743	6.00	0.219	10.00	0.617
1.80	0.0200	3.80	0.0890	6.50	0.2604	11.00	0.746
2.00	0.0247	4.00	0.0986	7.00	0.298	12.00	0.888
2.20	0.0302	4.20	0.107	7.50	0.342		

注：①钢丝采用GB 1222—84《弹簧钢》中的 50 CrVA 钢制成，适用于制造普通机械弹簧。钢丝绕成弹簧后需进行热

处理（淬火和回火）。

②钢丝按交货状态，分冷拉(L)和退火（T）两种。

③直径大于5 mm的钢丝在交货状态下，其抗拉强度不得大于1029 MPa；也可用硬度检验代替拉力试验，其硬度值不得大于 HB 302。

④钢丝的工艺性能和表面质量，应符合本标准内的有关规定。

表 3.1.3-49 **铬钒弹簧钢丝的化学成分** （摘自GB 5219—85）

钢号	化学成分(%)							
	C	Mn	Si	Cr	V	Ni	S	P
						不大于(%)		
50 CrVA	0.47～0.55	0.3～0.6	0.15～0.30	0.75～1.10	0.15～0.25	0.30	0.03	0.03

表 3.1.3-50 **阀门用铬钒弹簧钢丝** （摘自GB 5220-85）

直径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	直径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	直径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)	直径 (mm)	理论质量 kg/m (相对密度 7.85)
0.50	0.00154	2.00	0.0247	4.20	0.107	8.00	0.389
0.60	0.00219	2.20	0.0302	4.50	0.125	8.50	0.440
0.70	0.00298	2.50	0.0381	4.80	0.140	9.00	0.493
0.80	0.00395	2.80	0.0478	5.00	0.154	9.50	0.549
1.00	0.00617	3.00	0.0555	5.50	0.1845	10.00	0.617
1.20	0.00888	3.20	0.0624	6.00	0.219	11.00	0.746
1.40	0.0121	3.50	0.0743	6.50	0.2604	12.00	0.888
1.60	0.0158	3.80	0.0890	7.00	0.298		
1.80	0.0200	4.00	0.0986	7.50	0.342		

注：①钢丝采用GB 1222—84《弹簧钢》中的50 CrVA 钢制成，适用于制造阀门弹簧。钢丝绕成弹簧后需进行热处理（淬火及回火）。

②钢丝按交货状态分为：冷拉(L)、退火（T)、冷拉＋银亮（L＋Zy)、退火＋银亮（T＋Zy）等4种。

③钢丝的机械性能应符合下表规定：

交货状态	抗拉强度 σ_b (MPa)	硬度（HB)
退火	≤784	≤240
冷拉	≤1029	≤306

钢丝也可用试样热处理后的机械性能试验，代替成品钢丝的抗拉强度及硬度的试验。

钢号	热处理制度					机械性能	
	淬火		回火			抗拉强度 σ_b (MPa)	断面收缩率 ψ (%) 不小于
	温度 (℃)	冷却剂	温度 (℃)	时间 (min)	冷却剂		
50 CrVA	840～860	油	370～420	≥30	油或水	1470～1764	40

上列二法，采用哪一种，在合同中注明。

④钢丝的工艺性能和表面质量，应符合本标准内有关规定。

6.5 碳素弹簧钢丝

钢丝依其机械性能的不同，分为四组，即I组、II组、IIa组和III组。

此类钢丝主要用于冷状态下缠制弹簧，不经过热处理。

碳素弹簧钢丝的直径、机械性能和质量见表 3.1.3-51。

表 3.1.3-51　　　　碳素弹簧钢丝　　　　（摘自GB 4357—84）

钢丝直径 (mm)	机械性能				理论质量 (kg/m)
	抗拉强度 σ_b (MPa)			扭转次数	
	A 组	B 组	C 组	不少于	
0.08	2059～2452	2403～2795	2746～3183	20	0.000039
0.09	2010～2403	2354～2746	2697～3089		0.000049
0.10	1961～2354	2305～2697	2648～3040		0.000062
0.12	1912～2305	2256～2648	2599～2991		0.000089
0.14	1863～2305	2206～2599	2550～2942		0.000121
0.16	1814～2256	2158～2550	2501～2893		0.000158
0.18	1814～2256	2158～2550	2452～2844		0.000200
0.20	1814～2256	2158～2550	2403～2795		0.000247
0.23	1765～2206	2108～2501	2354～2746		0.000326
0.26	1716～2158	2059～2452	2305～2697		0.000417
0.29	1667～2108	2010～2403	2256～2648		0.000513
0.32	1618～2059	1961～2354	2206～2599		0.000624
0.35	1618～2059	1961～2354	2206～2599		0.000743
0.40	1569～2010	1912～2305	2158～2550		0.00099
0.45	1471～1961	1863～2256	2108～2501		0.00125
0.50	1471～1961	1863～2256	2108～2501		0.00154
0.55	1471～1912	1814～2206	2059～2452		0.00185
0.60	1471～1863	1765～2158	2010～2403		0.00219
0.65	1471～1863	1765～2108	2010～2403		0.00260
0.70	1422～1814	1716～2059	1961～2354		0.00298
0.80	1422～1814	1716～2059	1912～2305		0.00395
0.90	1422～1814	1716～2059	1912～2256		0.00493
1.00	1373～1765	1667～2010	1863～2206		0.00617
1.20	1324～1716	1618～1961	1814～2158		0.00888
1.40	1324～1667	1618～1912	1765～2108		0.0121
1.60	1275～1618	1569～1863	1765～2108		0.0158
1.80	1226～1569	1520～1814	1716～2059		0.0200
2.00	1177～1520	1471～1765	1716～2010		0.0247
2.30	1177～1471	1422～1716	1667～1961	15	0.0326
2.60	1177～1471	1422～1716	1667～1961		0.0417
2.9	1128～1422	1373～1667	1618～1912		0.0513
3.2	1128～1422	1324～1618	1569～1863		0.0624
3.5	1128～1422	1324～1618	1569～1814		0.0743
4.0	1128～1422	1324～1618	1520～1765	10	0.0986
4.5	1079～1373	1324～1569	1520～1765		0.1250
5.0	1079～1373	1324～1569	1471～1716		0.1540
5.5	1030～1324	1275～1520	1471～1716		0.1845
6.0	981～1275	1226～1471	1422～1667		0.2190

续上表

钢丝直径 (mm)	机械性能				理论质量 (kg/m)
	抗拉强度 σ_b (MPa)			扭转次数	
	A 组	B 组	C 组	不少于	
6.5	981～1226	1226～1471	1422～1618	—	0.2604
7.0	932～1177	1177～1422	1373～1569		0.2980
8.0	932～1177	1177～1422	1373～1569		0.3890
9.0	932～1177	1128～1324	1324～1520		0.4930
10.0	932～1177	1128～1324	1324～1520		0.6170
11.0	—	1079～1275	1275～1471		0.7460
12.0	—	1079～1275	1275～1471		0.8880
13.0	—	1030～1226	1226～1422		1.0400

注：①钢丝系采用GB 4354—84《优质碳素钢盘条》中规定的钢冷拉制成。

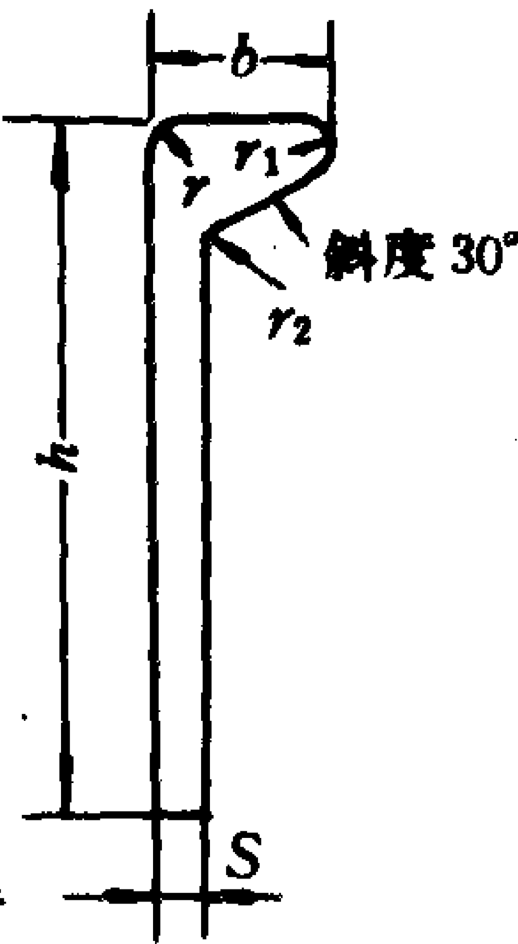
②钢丝按用途分为 A,B,C三组，A组用于一般弹簧及其它用途，B 组用于低应力弹簧，C组用于较高应力弹簧。

7 造船工业用钢

7.1 造船用球扁钢

造船用球扁钢图形尺寸和理论质量见表 3.1.3-52。

表 3.1.3-52 **球扁钢的图形、尺寸及理论质量** (摘自YB 473—85)



h—高度；b—球宽度；*s*—壁厚；*r*—球顶面与壁面间的圆角半径；r_1—球端圆角半径；r_2—球斜面与壁面间的圆角半径.

型钢号数	尺寸 (mm)				截面面积 (cm²)	理论质量 (kg/m)	型钢号数	尺寸 (mm)				截面面积 (cm²)	理论质量 (kg/m)
	h	*b*	*s*	r、r_1 及 r_2				*h*	*b*	*s*	r、r_1 及 r_2		
5	50	16	4	2.5	2.87	2.25	18a	180	40	9	7	22.20	17.40
5.5	55	17	4.5	3	3.48	2.73	18b		42	11		25.80	20.20
6	60	19	5	3.5	4.27	3.35	20a	200	44	10	8	27.36	12.45
7	70	21	5	3.5	5.06	3.97	20b		46	12		31.36	24.60

续上表

型钢号数	尺寸 h (mm)	b	s	r、r_1 及 r_2	截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)	型钢号数	尺寸 h (mm)	b	s	r、r_1 及 r_2	截面面积 (cm^2)	理论质量 (kg/m)
8	80	22	5	4	5.84	4.58	22 a	220	48	11	8.5	32.82	25.80
9	90	24	5.5	4	7.03	5.52	22 b		50	13		37.22	29.20
10	100	26	6	5	8.63	6.76	24 a	240	52	12	9	38.75	30.40
12	120	30	6.5	5	11.15	8.75	24 b		54	14		43.55	34.20
14 a	140	33	7	6	14.05	11.05	27 a	270	55	12	9.5	43.82	34.40
14 b		35	9		16.85	13.25	27 b		57	14		49.22	38.60
16 a	160	36	8	7	17.96	14.10							
16 b		38	10		21.16	16.60							

注：①球扁钢的通常长度：

单面球扁钢型号	通常长度，m
5,6	4～9
7～12	4～12
14～22	4～19
24,27	4～19

②根据供需双方协议，可供应对称轧制的球扁钢。

③标记举例：造船用热轧碳素钢钢号 4 C 的 12 号 单面船用球扁钢的标记为：

造船用球扁钢$\frac{\text{12-YB 473—85}}{\text{4 C-GB 712—80}}$。

7.2 造船用碳素钢和低合金钢钢板

造船用碳素钢及低合金钢钢板的钢号和化学成分、机械性能见表 3.1.3-53～表 3.1.3-55。

表 3.1.3-53 钢号和钢的化学成分 （摘自YB 183—70）

钢类	钢号	C	Mn	Si	Ti	V	P 不大于	S 不大于	Xt
碳素钢	2 C	<0.22	≥2.5 C	0.10～0.35			0.045	0.050	
	3 C	<0.21	0.60～1.00	0.10～0.35			0.040	0.040	
	4 C	<0.21	0.60～1.10	0.10～0.35			0.040	0.040	
	5 C	<0.18	0.70～1.20	0.10～0.35			0.040	0.040	
低合金钢	12 MnC	<0.16	1.10～1.50	0.20～0.60			0.040	0.040	
	16 MnC	<0.20	1.20～1.60	0.20～0.60			0.040	0.040	
	15 MnTiC	<0.18	1.20～1.60	0.20～0.60	0.12～0.20		0.040	0.040	
	14 MnVTiXtC	<0.18	1.30～1.60	0.20～0.60	0.09～0.16	0.04～0.10	0.040	0.040	≤0.20

注：①商品钢坯含碳量不限由供需双方协议规定。

②厚度不大于 12 mm的 2 C 钢含锰量下限可低于表中的规定。

③各碳素钢钢号成分中碳+1/6 锰不得超过 0.40%。在此条件下，3 C、4 C 钢中锰含量可达 1.20%。

④ 4 C、5 C钢采用铝脱氧，钢中酸溶铝 (Al_s) 含量应不小于 0.015%，或全铝(Al_t)含量应不小于 0.020%。

⑤厚度大于 25～35 mm的 4 C 钢，如以正火状态交货，含铝量可低于注④的规定。

⑥钢中铬、镍残余含量均不得大于 0.30%，铜残余含量不得大于 0.35%。如供方能保证残余元素的含量，可不进行分析。

表 3.1.3-54　　厚钢板、型钢的交货状态、机械性能和工艺性能

钢　号	交货状态	厚度 (mm)	屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	V 型冲击试验 温度 (℃)	平均冲击功, A_k(J) 横向	纵向	型钢冷弯试验 $b=2a$ 180°	钢板冷弯试验 窄冷弯 $b=2a$ 180°	宽冷弯 $b=5a$ 120°
			不小于				不小于				
2 C	热轧	<12 12~20 21~30 32~50	235	402~490	22	—	—	—	$d=2a$ $d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ $d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	—
3 C	热轧	<12 12~20 21~30 32~50	235	402~490	22	0	18	27	$d=2a$ $d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ — — $d=3a$	— $d=3a$ $d=3a$ —
4 C	热轧或正火	<12 12~20 21~30 32~50	235	402~490	22	−20	18	27	$d=2a$ $d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ — — $d=3a$	— $d=3a$ $d=3a$ —
5 C	正火	<12 12~20 21~30 32~50	235	402~490	22	−40	18	27	$d=2a$ $d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ — — $d=3a$	— $d=3a$ $d=3a$ —
12 MnC	热轧	≤16 17~25 26~36	294 274 255	441 431 421	21 19 19	0	—	49	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$
16 MnC	热轧	≤16 17~25 26~36 38~50	343 323 304 284	510 490 470 470	21 19 19 19	0	—	53	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=2a$ $d=3a$ $d=3a$ $d=3a$	$d=3a$ $d=3a$ $d=3a$ —
15 MnTiC	正火	≤25 26~40	392 372	529 510	19 19	0	—	56	$d=3a$ $d=3a$	— —	$d=3a$ $d=3a$
14 MnVTiXtC	正火	≤12 13~20	441 412	549 529	18 18				$d=2a$ $d=3a$	$d=2a$ —	— $d=3a$

注：①在保证其它性能情况下，碳素钢的抗拉强度σ_b上限：钢板可以到510.1 MPa，型钢可以到529.7 MPa。

②厚度不大于25 mm的3 C钢不做冲击试验。但根据需方要求，厚度不大于25 mm的3 C钢板可以做冲击试验。

③碳素钢冲击试验可采用纵向或横向试样，但须在合同中注明，如未注明，则采用纵向试样进行试验。

④14 MnVTiXtC 的平均冲击功A_k由供需双方协议规定。

⑤12 MnC、16 MnC的宽冷弯试验只供参考，不作交货条件。宽冷弯合格，可不做窄冷弯试验；宽冷弯不合格，应补做窄冷弯试验。

⑥厚度大于 35 mm 的 4 C钢应以正火状态交货。

表 3.1.3-55　　**薄钢板机械性能和工艺性能**

钢号	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_{10} (%) 厚度 (mm) 2~2.5	3~3.5	3.8~4	冷弯试验 180° $b=2a$
		不小于			
2C	≥402	14	15	16	$d=2a$

7.3 造船用钢板分类

船用钢板的钢号及尺寸见表 3.1.3-56、表 3.1.3-57。

表 3.1.3-56　　**船用薄钢板的钢号及尺寸**

钢号	尺寸 (mm) 厚度	宽度	长度
1C,2C,3C	2.0	800~1100	4000~6000
	2.5,3.0,3.5	800~1250	
	4.0	800~1300	
1C,2C	1.0,1.2,1.5,2.0	1000	2000

表 3.1.3-57　　**船用厚钢板的钢号及尺寸**

钢号	尺寸 (mm) 厚度	宽度	长度
1C~4C 12MnC 16MnC 12MnVC 15MnVC 15MnTiC	4.5,5,6,7,8,9,10, 11,12,13,14,15,16,17, 18,19,20,22,24,25,26, 28,30,32,34,36,38,40, 42,44,46,48,50	1000~2400	2000~12000
14MnVTiREC	55,60,65,70,75,80, 85,90,95,100,110,120	1000~1800	3000~5000

8　常用电焊条

8.1　电焊条牌号编制方法

8.1.1　编制方法说明

1)电焊条牌号系指手工电弧焊的焊条牌号，共分 11 大类:

(1)结构钢电焊条（包括普低钢电焊条)。

(2)珠光体耐热钢电焊条。

(3)低温钢电焊条。

(4)奥氏体不锈钢电焊条。

(5)铬不锈钢电焊条。

(6)堆焊电焊条。

(7)铸铁电焊条。

（8）铜及铜合金电焊条。

（9）镍及镍合金电焊条。

（10）铝及铝合金电焊条。

（11）特殊用途电焊条。

2）牌号前加汉字表示电焊条种类。汉字后面的三位数字中，前二个数字表示各大类中的若干小类。第三位数字表示各种焊条牌号的药皮类型及焊接电源，见表 3.1.3-58。

表 3.1.3-58　　**焊条牌号所表示的药皮类型及焊接电源**

牌　号	药皮类型	焊接电源种类	牌　号	药皮类型	焊接电源种类
××0	不属已规定的类型	不　规　定	××5	锰　型	直流或交流
××1	钛　型	直流或交流	××6	低氢型	直流或交流
××2	钛 钙 型	直流或交流	××7	低氢型	直　流
××3	钛铁矿型	直流或交流	××8	石墨型	直流或交流
××4	氧化铁型	直流或交流	××9	盐基型	直　流

3）用于铸铁焊补的某些镍及镍合金焊条列在铸铁类牌号中；某些不锈钢焊条主要用于堆焊，故在编制时列在堆焊类牌号中。

8.1.2　电焊条牌号分类编制方法

电焊条牌号分类编制方法见表 3.1.3 59。

表 3.1.3-59　　**电 焊 条 分 类 表**

类别	焊条牌号举例	焊条牌号中汉字、数字代表意义说明					相应附表		
		牌号前汉字	第一位数字	第二位数字	第三位数字	其它	牌号	焊缝金属抗拉强度等级（MPa）	相应屈服强度等级（MPa）
第一类结构钢焊条（包括普低钢焊条）	结 422 结 422 铁 结 507 铜磷	“结”代表结构钢焊条	前二位数字表示焊缝金属抗拉强度等级，其系列如右附表		表示药皮类型和焊接电源种类	1.牌号末尾加注“铁”表示铁粉型焊条，如结 422 铁； 2.牌号末尾的其它加注表示焊条的特殊性能和用途，如结 507 铜磷，表示用于焊接含铜磷耐蚀钢；结 420 下表示立向下焊专用焊条	结 42×	420	300
							结 50×	500	350
							结 55×	550	400
							结 60×	600	450
							结 70×	700	500
							结 85×	850	
							结 10×	1000	
第二类珠光体耐热钢焊条	热 347 热 307	“热”代表珠光体耐热钢焊条	表示焊缝金属主要化学成分等级，详见右附表，如热 3××代表含铬约 1%，含钼约 0.5%	表示同一焊缝金属主要化学成分等级中的不同牌号，可从 0、1、2……9 编排	表示药皮类型和焊接电源种类		牌　号	焊缝金属主要化学成分组成等级（%）	
							热 1××	含钼约 0.5	
							热 2××	含铬约 0.5，含钼约 0.5	
							热 3××	含铬约 1，含钼约 0.5	
							热 4××	含铬约 2.5，含钼约 1	
							热 5××	含铬约 5，含钼约 0.5	
							热 6××	含铬约 7，含钼约 1	
							热 7××	含铬约 9，含钼约 1	
							热 8××	含铬约 11，含钼约 1	

续上表

类别	焊条牌号举例	焊条牌号中汉字、数字代表意义说明：牌号前汉字	第一位数字	第二位数字	第三位数字	相应附表：牌号	相应附表
						牌号	低温温度等级(℃)
第三类低温钢焊条	低 207	"低"代表低温钢焊条	表示低温钢焊条工作、温度等级，按右附表编排	表示同一温度等级中的不同牌号，按0、1、2……9顺序排列	表示药皮类型和焊接电源种类	低 1××	−70
						低 2××	−90
						低 3××	−120
						低 4××	−196
						低 5××	−253
						牌号	焊缝金属主要化学成分等级(%)
第四类奥氏体不锈钢焊条	奥 022 奥 107	"奥"代表奥氏体不锈钢焊条	表示焊缝金属主要化学成分组成等级，按右附表编排	表示同一焊缝金属化学成分等级中的不同牌号，按0、1、2……9顺序编排	表示药皮类型和焊接电源种类	奥 0××	含碳不大于0.04(超低碳)
						奥 1××	含铬约为18，含镍约为8
						奥 2××	含铬约为18，含镍约为12
						奥 3××	含铬约为25，含镍约为13
						奥 4××	含铬约为25，含镍约为20
						奥 5××	含铬约为16，含镍约为25
第五类铬不锈钢焊条	铬 202	"铬"代表铬不锈钢焊条	表示焊缝金属主要化学成分组成等级，按其对应的右附表编排	表示同一焊缝金属化学成分等级中的不同牌号按0、1、2……9顺序编排	表示药皮类型和焊接电源种类	奥 6××	含铬约为15，含镍约为35
						奥 7××	铬锰氮不锈钢
						奥 8××	含铬约为18，含镍约为18
						奥 9××	待发展
						牌号	焊缝金属主要化学成分组成等级(%)
						铬 2××	含铬约为13
						铬 3××	含铬约为17
						铬 4××	含铬约为25
						铬 5××	待发展

续上表

类别	焊条牌号举例	焊条牌号中汉字、数字代表意义说明				相应附表	
		牌号前汉字	第一位数字	第二位数字	第三位数字	牌号	用途、组织或焊缝主要成分
第六类堆焊焊条	堆397	"堆"代表堆焊焊条	表示堆焊焊条的用途、组织或焊缝金属主要成分，按右附表规定编排	表示同一用途、组织或焊缝金属主要成分中的不同牌号。对同一药皮类型的堆焊焊条，按0、1、2……9顺序排列	表示药皮类型和焊接电源种类	堆1××	普通常温用（包括锰13堆焊）
						堆2××	普通常温用（包括锰13堆焊）
						堆3××	刀具及工具用
						堆4××	刀具及工具用
						堆5××	阀门用
						堆6××	合金铸铁型
						堆7××	合金铸铁型
						堆8××	钴基合金
						堆9××	待发展
第七类铸铁焊条	铸208	"铸"代表铸铁焊条	表示焊缝金属主要化学成分组成类型，按右附表规定编排	表示同一焊缝金属主要化学成分组成类型中的不同牌号，按0、1、2……9顺序排列	表示药皮类型和焊接电源种类	牌号	焊缝金属主要化学成分组成类型
						铸1××	碳钢或高钒钢
						铸2××	铸铁（包括球墨铸铁）
						铸3××	纯镍
						铸4××	镍铁
						铸5××	镍铜
						铸6××	铜铁
						铸7××	待发展

8.2 电焊条分类

结构钢电焊条、珠光体耐热钢电焊条、低温电焊条、奥氏体不锈钢电焊条、铬不锈钢电焊条的牌号、化学成分与机械性能见表3.1.3-60至表3.1.3-65。

表 3.1.3-60

结构钢电焊条

焊条牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	规格直径 (mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	S	P	Mo	Cr	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	冲击值 α_k(J/cm²)	主要用途
												不	小	于	
结 421	T 421	钛型	交直流	1.6,2.0,2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.3~0.6	≤0.35	≤0.035	≤0.05			412	17	78	焊接一般低碳钢结构，特别适用于薄板小件及短焊缝的间断焊和要求表面光洁的盖面焊
结 422	T 422	钛钙型	交直流	2.0,2.5,3.2,4.0,5.0,5.8	≤0.12	0.3~0.6	≤0.25	≤0.035	≤0.05			412	18	78	用于焊接较重要的低碳钢结构和强度等级低的普低钢，如 09 锰 2 等
结 423	T 423	钛铁矿型	交直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.35~0.60	≤0.20	≤0.035	≤0.05			412	18	78	可焊接较重要的低碳钢结构
结 424	T 424	氧化铁型	交直流	2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.50~0.90	≤0.15	≤0.035	≤0.05			412	18	78	可焊接较重要的低碳钢结构
结 425	T 425	锰型	交直流	3.2,4.0,5.0,5.8	≤0.12	0.6~1.0	≤0.20	≤0.035	≤0.05			412	18	78	焊接一般低碳钢结构及铸钢件的焊补
结 426	T 426	低氢型	交直流	2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.5~0.8	≤0.5	≤0.035	≤0.04			412	22	137	适用于没有直流焊机场合，用于焊接重要的低碳钢和普低钢的结构，如 09 锰 2 等
结 427	T 427	低氢型	直流	2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.5~0.8	≤0.50	≤0.035	≤0.04			412	22	137	用来焊接重要的低碳钢和普低钢结构，如 09 锰 2 等
结 502	T 502	钛钙型	交直流	3.2,4.0,5.0,5.8	≤0.12	0.5~0.9	≤0.30	≤0.035	≤0.05			490	16	58	主要用于 16 锰等普低钢结构的焊接
结 503	T 503	钛铁矿型	交直流	3.2,4.0,5.0,5.8	≤0.12	0.5~0.9	≤0.30	≤0.035	≤0.05			490	16	58	适用于普低钢的焊接，如 16 锰等
结 506	T 506	低氢型	交直流	2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.8~1.3	≤0.65	≤0.035	≤0.04			490	20	127	适用于没有直流焊机场合用于中碳钢和普低钢的焊接，如 16 锰、09 锰 2 硅等
结 506 铁	T 506 Fe	低氢型	交直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.6~1.2	≤0.65	≤0.035	≤0.04			490	20	127	适用于普低钢的焊接，如 16 锰等
结 507	T 507	低氢型	直流	2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.8~1.3	≤0.65	≤0.035	≤0.04			490	20	127	可焊接中碳钢和某些普低钢。如 09 锰 2 硅、16 锰、09 锰 2 钒等

续上表

焊条牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%)							机械性能			主要用途
					C	Mn	Si	S	P	Mo	Cr	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	冲击值 a_k (J/cm²)	
												不	小	于	
结553	新增加	钛铁矿型	交直流	3.2,4.0,5.0,5.8	≤0.12	0.6~1.2	≤0.3	≤0.035	≤0.05			540	16	68	用于焊接相应强度的15锰钒、15锰钛等普低钢结构
结556	T 556	低氢型	交直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.9~1.5	0.3~0.70	≤0.035	≤0.04			540	20	118	适用于没有直流焊机场合，焊接中碳钢和15锰钛、15锰钒等普低钢结构
结557	T 557	低氢型	直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.9~1.5	0.3~0.70	≤0.035	≤0.04			540	20	118	用于焊接中碳钢和15锰钛、15锰钒等普低钢结构
结606	T 606	低氢型	交直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	1.0~1.6	0.3~0.7	≤0.035	≤0.04	0.15~0.4		589	18	98	适用于没有直流焊机场合，用于焊接中碳钢及相应强度的低合金高强度钢结构如15锰钒氮等
结607	T 607	低氢型	直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	1.0~1.6	0.3~0.7	≤0.035	≤0.04	0.15~0.4		589	18	98	用于焊接中碳钢及相应强度的低合金高强度钢结构，如15锰钒氮等
结707	T 707	低氢型	直流	3.2,4.0,5.0	≤0.12	1.2~2.0	0.3~0.8	≤0.035	≤0.035	0.3~0.6		687	12	59	用于焊接15锰钼钒、14锰钼钒硼、18锰钼铌等。焊后结构可在焊态或回火(550~650℃)条件下工作

表 3.1.3-61　**珠光体耐热钢电焊条**

牌号	符合国际	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%)							机械性能			施焊条件	主要用途
					C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	冲击值 a_K (J/cm²)		
												不小于				
热107	TR 1—7	低氢型	直流	2.5,3.2,4.0,5.0	≤0.12	0.50~0.90	≤0.50			0.40~0.70		490	18	78	焊件需预热至150~250℃，焊后需经620~700℃回火处理	用于焊接工作温度在510℃以下的珠光体耐热钢(如15钼等)。和锅炉管道等相应钢种构件的焊接，也可用来焊接一般低合金高强度钢

续上表

牌号	符合国际	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	机械性能 抗拉强度 σ_b(MPa)	伸长率δ(%)	冲击值a_K(J/cm²)	施焊条件	主要用途
												不小于				
热202	TR 2—2	钛钙型	交直流	2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	0.5~0.9	≤0.50	0.35~0.65		0.40~0.70		490	18	78	焊件需预热至150~300℃,焊后需经670~710℃回火处理	用于焊接工作温度在510℃以下的珠光体耐热钢(如12铬钼钢)和蒸汽管道及过热器管道等焊接
热207	TR 2—7	低氢型	直流	2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	0.50~0.90	≤0.5	0.35~0.65		0.40~0.70		490	18	78	焊件需预热至150~300℃,焊后需经670~710℃回火处理	用于焊接工作温度在510℃以下的珠光体耐热钢(如12铬钼钢等)和高温高压锅炉管道、化工容器等相应钢种构件的焊接
热307	TR 3—7	低氢型	直流	2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	0.5~0.9	≤0.50	0.7~1.10		0.4~0.7		490	16	78	焊件需预热至250~350℃,焊后需经680~720℃回火处理	用于焊接工作温度在520℃以下的珠光体耐热钢(如15铬钼钢等)和高温高压锅炉管道,高压容器构件的焊接
热317	TR 3 V—7	低氢型	直流	2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	0.50~0.90	≤0.50	0.80~1.20		0.40~0.70	V 0.10~0.35	490	16	78	焊件需预热至250~350℃,焊后需经680~750℃回火处理	用于焊接工作温度在540℃以下的铬钼钒珠光体耐热钢结构,如高温高压锅炉管道等
热327	TR 3 V W—7	低氢型	直流	2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	0.7~1.1	0.2~0.45	1.00~1.40		0.7~1.0	W 0.25~0.50 V 0.2~0.35	490	14	58	焊件需预热至300℃左右,焊后需经720~750℃回火处理	用于工作温度在570℃以下的15铬钼钒耐热钢的焊接

续上表

牌号	符合国际	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	伸长率 δ (%) 不小于	冲击值 α_K (J/cm²) 不小于	施焊条件	主要用途
热 347	新增加	低氢型	直流	3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	≤1.0	≤0.65	1.5~2.5		0.30~0.80	V 0.20~0.60 W 0.20~0.60 B 0.001~0.003	490	14	78	焊件需预热至350℃左右，焊后经760℃回火处理（灰中缓冷）	用于焊接工作温度在620℃以下相应的珠光体耐热钢结构，如高温高压汽轮发电机组、锅炉管道等

表 3.1.3-62　　低温钢电焊条

牌号	符合国际	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	伸长率 δ (%) 不小于	常温冲击值 α_K (J/cm²) 不小于	其它	施焊条件	主要用途
低 207	新增加	低氢型	直流	3.2, 4.0, 5.0	~0.08	~0.9	~0.3		~3.5			540~637	235~314	127	低温冲击 4	焊件预热150℃左右，可进行600~650℃的消除应力回火	用于焊接-90℃工作的含镍3.5%的低温用的低合金结构钢
低 407	新增加	低氢型	直流	2.5, 3.2, 4.0, 5.0	~0.10			~15	~24	~5	W ~0.8	608~706	294~490	156~215	低温冲击 8~14	焊接镍9钢时，焊件应预热100~150℃	用于焊接-150~-196℃低温用钢，如镍9钢以及异种钢的焊接

表 3.1.3-63　　奥氏体不锈钢电焊条

牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	伸长率 Δ_δ (%) 不小于	头部色别	主要用途
奥 032	新增加	钛钙型	交直流	2.0, 2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.04	≤2.50	≤1.00	18.0~21.0	11.0~14.0	2.0~3.0	Cu 1.0~2.0	540	25	棕色	用于焊接合成纤维等设备在稀、中浓度硫酸介质中工作的同类型超低碳不锈钢结构，也可焊接铬10硅3耐酸钢

续上表

牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	伸长率 Δ_s (%) 不小于	头部色别	主要用途
奥102	TA 1—2	钛钙型	交直流	2.0，2.5，3.2，4.0，5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.20	18.0~21.0	8.0~11.0			540	30	中绿	用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的0铬18镍9，铬18镍9钛的不锈钢结构
奥107	TA 1—7	低氢型	直流	2.0，2.5，3.2，4.0，5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.20	18.0~21.0	8.0~11.0			540	30	中绿	用于焊接工作温度低于300℃的耐腐蚀的铬18镍9型不锈钢结构，也可焊接一些可焊性较差的钢材(如高铬钢等)以及堆焊不锈钢表面层
奥112	TA 1P—2	钛钙型	交直流	2.0，2.5，3.2，4.0，5.0	≤0.12	≤2.50	≤1.50	17.0~22.0	7.0~11.0			540	25	无色	用于一般耐腐蚀要求不高的铬18镍9型不锈钢的焊接。焊缝如经~1000℃水韧处理，可获得较好的抗晶间腐蚀性能。适宜于薄板俯焊及不锈钢表面堆焊
奥117	TA 1P—7	低氢型	直流	3.2，4.0，5.0	≤0.12	≤2.50	≤1.50	17.0~22.0	7.0~11.0			540	25	无色	用于一般耐腐蚀要求不高的铬18镍9型不锈钢的焊接，焊缝如经~1000℃水韧处理，可获得较好的抗晶间腐蚀性能
奥137	Nb1 Nb—7	低氢型	直流	2.0，2.5，3.2，4.0，5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.00	18.0~21.0	8.0~11.0		Nb 8×C~1.00	540	25	中黄	用于焊接重要的含钛稳定的铬18镍9型不锈钢结构
奥202	TA 1Mo 2—2	钛钙型	交直流	2.0，2.5，3.2，4.0，5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.00	17.0~20.0	10.0~13.0	2.0~3.0		540	25	大红	用于焊接在有机和无机酸介质中工作的铬18镍12钼2钛不锈钢设备，也可用于焊后不能进行热处理的高铬钢和异种钢(低碳钢与不锈钢)焊接
奥232	新增加	钛钙型	交直流	3.2，4.0，5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.00	17.0~20.0	10.0~13.0	2.0~3.0	V 0.30~0.70	540	25	粉红	可焊接一般耐热及要求耐蚀的铬18镍9钛及铬18镍12钼2钛不锈钢结构

续上表

牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其它	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	伸长率 Δ_s (%) 不小于	头部色别	主要用途
奥237	新增加	低氢型	直流	2.0, 2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.00	17.0~20.0	10.0~13.0	2.0~3.00	V 0.30~0.70	540	25	粉红	用于要求一般耐热而又要求一定耐蚀性的铬18镍9钛及铬18镍12钼2钛不锈钢结构的多层焊接
奥242	TA 1 Mo 3—2	钛钙型	交直流	2.0, 2.5, 3.2, 4.0, 5.0	≤0.08	≤2.50	≤1.00	18.0~21.0	11.0~14.0	3.0~4.0		540	25	中蓝	用于相同类型的不锈钢材料以及异种钢，复合钢的焊接

表 3.1.3-64　　**铬不锈钢焊条**

牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	规格直径(mm)	焊缝金属化学成分(%) C	Mn	Si	Cr	Ni	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) 不小于	伸长率 δ (%) 不小于	施焊条件	主要用途
铬202	TG 1—2	钛钙型	交直流	3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	≤1.00	≤0.90	11.0~14.0	≤0.60	490	20	焊前焊件需预热至250~350℃，焊后经700~730℃回火处理	用于焊接0铬13及1铬13不锈钢结构。也可用于耐蚀、耐磨的表面堆焊
铬207	TG 1—7	低氢型	直流	3.2, 4.0, 5.0	≤0.12	≤1.00	≤0.90	11.0~14.0	≤0.60	490	20	焊前焊件需预热至250~350℃，焊后经700~730℃回火处理	用于焊接0铬13,1铬13不锈钢结构，也可用于耐蚀、耐磨的表面堆焊

表 3.1.3-65　　**铸铁电焊条**

牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	焊缝金属主要组成	焊芯主要成分	规格直径(mm)	施焊条件	主要用途
铸100	TZG—1	氧化型	交直流	碳钢	碳钢	3.2, 4.0, 5.0	尽可能采用小电流，焊件最好能预热至400℃以上，焊后缓冷	用于一般铸铁件缺陷的修补。并能焊补长期使用的旧钢锭模。焊后不能进行切削加工
铸116 铸117	TZG—3	低氢型	交直流 直流	高钒钢	碳钢(高钒药皮)	2.5, 3.2, 4.0	铸116焊条尽可能采用直流电源，焊条接正极。在无直流电源的情况下，也可采用交流电源，但空载电压要求高一些。此焊条其性能、用途、均与铸117相同。焊接时尽可能采用小电流多层焊	本焊条可用于铸铁件缺陷的修补，如汽缸体、机架、齿轮箱等，也可焊补高强度铸铁件。焊件可不进行预热，焊后可以进行切削加工。但加工性能不如铸508、铸308和铸408

续上表

牌号	符合国标	药皮类型	焊接电源	焊缝金属主要组成	焊芯主要成分	规格直径(mm)	施焊条件	主要用途
铸208	TZG—2	石墨型	交直流	灰口铸铁（缓冷）	碳钢	3.2, 4.0, 5.0	焊件预热至400℃左右，焊后保温缓冷	用于修补灰口铸铁件的缺陷
铸238	TZG—4	石墨型	交直流		碳钢（药皮中加球化剂）	3.2, 4.0, 4.0	焊前预热至500℃左右，焊后保温缓冷	用于焊补球墨铸铁件
铸408	TZNiFe	石墨型	交直流	镍铁	镍铁合金	2.5, 3.2, 4.0	焊前应将焊条在150℃左右烘焙2小时	适用于重要灰口铸铁及球墨铸铁件的焊补，如汽缸、发动机座、齿轮等。对含磷较高(磷～0.2%)的铸铁件焊接，也有良好的效果
铸508	TZNiCu	石墨型	交直流	镍铜	镍铜合金	2.5, 3.2, 4.0	焊时，以窄道焊为宜，焊后应立即轻轻锤击焊缝处，以消除应力	适用于灰口铸铁件的焊补

第 4 章　轮机常用钢铁材料的化学成分、机械性能和使用范围

1　碳素钢

1.1　普通碳素结构钢

普通碳素钢由于冶炼容易，不消耗贵重的合金元素，对碳、磷、硫和其它残余元素的含量及性能范围要求限制较宽，便于大量生产应用。

普通碳素钢可以根据所保证的条件的不同分为按机械性能供应的甲类钢，按化学成分供应的乙类钢和按机械性能及化学成分供应的特类钢。

对于普通碳素钢，应注意到由于冶炼方法和浇铸方法的不同所引起的性能差异。沸腾钢成材率较高，较便宜，但在截面中心区域碳、磷、硫较富集，偏析较大，钢中含气体较多，冲击韧性较低，因此脆性倾向和时效倾向较大，焊接性能较差，不适于制作在低温和有冲击负荷条件下工作的构件。镇静钢浇铸时没有气体产生、偏析较少。普通碳素钢都是由平炉和转炉冶炼的。转炉钢较便宜，但含气体较多。近年来用氧气炼钢法来提高转炉钢质量。

普通碳素钢一般是在热轧状态下使用。对低碳钢强化处理（水淬）可以显著提高钢的强度，而塑性降低不多，同时可提高冲击韧性，特别是低温冲击韧性，降低脆性临界温度及减少时效倾向。

普通碳素结构钢（GB 700～79），化学成分见表 3.1.4-1，机械性能见表 3.1.4-2，钢材尺寸分组见表 3.1.4-3。

表 3.1.4-1　　**普通碳素钢的化学成分**

钢号	化学成分（%）					用途
	C	Si	Mn	P	S	
				≤		
B1, BY1	0.06～0.12	0.12～0.30	0.25～0.50	0.045	0.050	用来做铁丝、铁钉、钢板、薄铁皮等，其型材可用于不重要的钢结构中
B1F BY1F		≤0.05				
B2 BY2 C2 CY2	0.09～0.15	0.12～0.30	0.25～0.55			
B2F BY2F C2F CY2F		≤0.07				
B3 BY3 C3 CY3	0.14～0.22	0.12～0.30	0.35～0.65			
B3F BY3F C3F CY3F		≤0.07	0.30～0.60			
B4 BY4 C4 CY4	0.18～0.28	0.12～0.30	0.40～0.70			用来做铸钢件、建筑材料、普通机件、角钢、工字钢等
B4F BY4F C4F CY4F		≤0.07				
B5 BY5 C5 CY5	0.28～0.38	0.15～0.35	0.50～0.80			
B6 BY6	0.38～0.50					
B7 BY7	0.50～0.62					

续上表

钢号	化学成分（%）					用途
	C	Si	Mn	P	S	
				≤		
BJ2 CJ2	0.06～0.12	0.10～0.30	0.25～0.55	0.045	0.055	
BJ2F CJ2F		≤0.07				
BJ3 CJ3	0.10～0.20	0.10～0.30	0.30～0.60			
BJ3F CJ3F		≤0.07				
BJ4 CJ4	0.16～0.26	0.10～0.35	0.30～0.70			
BJ4F CJ4F		≤0.07				
BJ5 CJ5	0.24～0.37	0.12～0.35	0.50～0.80			
BJ6	0.37～0.50					

注：①半镇静钢钢材及钢坯的化学成分，允许偏差为：C $^{+0.03}_{-0.02}$；Si $^{+0.03}_{-0.02}$；Mn $^{+0.05}_{-0.03}$；P +0.005；S +0.005。

②供轧制甲类钢钢材的钢锭（坯），其熔炼化学成分中碳、锰、硅含量应按表中相应乙类钢钢号的规定。

表 3.1.4-2　　**普通碳素钢机械性能**

钢号	机械性能						180°冷弯试验 d=弯心直径 a=试样厚度		用途
	屈服强度 $\sigma_s \geq$(MPa) 按尺寸分组			抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率(%) ≥				
	1组	2组	3组		δ_5	δ_{10}	型钢	钢板	
A1 A1F AY1 AY1F	—	—	—	314～392	33	28	$d=0$	$d=0.5a$	垫铁、铆钉、垫圈、地脚螺栓、开口销、拉杆、冲压零件及焊接件
A2 A2F AY2 AY2F AJ2 AJ2F C2 C2F CY2 CY2F CJ2 CJ2F	215	196	186	333～412	31	26		$d=a$	金属结构件、拉杆、套圈、铆钉、螺栓、短轴、心轴、凸轮、吊钩、垫圈、渗碳件
A3 AY3 AJ3 C3 CY3 CJ3	235	226	215	373～461	26	22	$d=0.5a$	$d=1.5a$	金属结构件、渗碳或氰化零件、吊钩、拉杆、套筒、气缸、齿轮、螺栓、螺母、连杆、轮轴、楔、盖及焊接件
A3F AY3F AJ3F C3F CY3F CJ3F	235	215	206						

续上表

钢号	机械性能						180°冷弯试验 d=弯心直径 a=试样厚度		用途
	屈服强度 $\sigma_s \geq$(MPa) 按尺寸分组			抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率(%) ≥		型钢	钢板	
	1组	2组	3组		δ_5	δ_{10}			
A4 A4F AY4 AY4F AJ4 AJ4F C4 C4F CY4 CY4F CJ4 CJ4F	255	245	235	412～510	24	20	$d=2a$		金属结构件、转轴、心轴、拉杆、吊钩、箍、摇杆螺栓、楔等
A5 AY5 AJ5 C5 CY5 CJ5	275	265	255	490～608	20	16	$d=3a$		转轴、心轴、销轴、链轮、刹车杆、螺栓、螺母、垫圈、连杆、吊钩、楔、齿轮等
A6 AY6 AJ6	304	294	294	588～706	15	12	——		转轴、心轴、离合器、链环片、刹车钢带、键等
A7 AY7	—	—	—	≥687	10	8	——		

注：①GB 700-79 适用于热轧普通碳素结构钢型钢（条钢和异型钢）及钢板。其化学成分也适用于钢锭、钢坯及其制品。
②屈服强度σ_s按钢材尺寸分 3 组，各组钢材尺寸按表 3.1.4-3 分。

表 3.1.4-3　　钢材尺寸分组

组别	钢材尺寸 (mm)		
	条钢直径或厚度	异型钢厚度	钢板厚度
第 1 组	≤40	≤15	4～20
第 2 组	>40～100	>15～20	>20～40
第 3 组	>100～250	>20	>40～60

1.2　优质碳素结构钢

优质碳素结构钢与普通碳素结构钢不同，既须保证化学成分，又须保证正火状态下的机械性能，其磷、硫含量较低，钢中非金属夹杂较少。按锰含量的不同这类钢分为两组：普通含锰量钢和较高锰含量钢。后者由于提高了锰含量，具有较高的淬透性、强度，但韧性略低。

低碳钢、部分低碳沸腾钢用于制造板材，供冲压用。15，20，15 Mn 等常进行渗碳或碳氮共渗，用于制造摩擦片、活塞销、不重要的齿轮等。

中碳钢常用于制造各种要求有较好综合机械性能的零件，常采用调质处理。45 钢在轮机制造中用量很大，常用做活塞杆、阀杆、摇臂、曲轴、中间轴、尾轴、凸轮轴、齿轮及其它轴类零件等。

优质碳素结构钢（GB 699—65）的化学成分见表 3.1.4-4，机械性能见表 3.1.4-5。该标准适用于直径或厚度到 250 mm的热轧和锻制优质碳素结构钢条钢。标准中化学成分适用于钢锭、初轧坯、板坯、钢坯、钢板、钢带、宽扁钢、钢管、钢丝、锻件和冲压件。

表 3.1.4-4

优质碳素结构钢化学成分

钢组	钢号	化学成分（%） C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
					≤	≤	≤	≤
普通含锰量钢	05 F	≤0.06	≤0.03	≤0.40	0.035	0.040	0.10	0.25
	08 F	0.05～0.11	≤0.03	0.25～0.50	0.040	0.040	0.10	0.25
	08	0.05～0.12	0.17～0.37	0.35～0.65	0.035	0.040	0.10	0.25
	10 F	0.07～0.14	≤0.07	0.25～0.50	0.040	0.040	0.15	0.25
	10	0.07～0.14	0.17～0.37	0.35～0.65	0.035	0.040	0.15	0.25
	15 F	0.12～0.19	≤0.07	0.25～0.50	0.040	0.040	0.25	0.25
	15	0.12～0.19	0.17～0.37	0.35～0.65	0.040	0.040	0.25	0.25
	20 F	0.17～0.24	≤0.07	0.25～0.50	0.040	0.040	0.25	0.25
	20	0.17～0.24	0.17～0.37	0.35～0.65	0.040	0.040	0.25	0.25
	25	0.22～0.30	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	30	0.27～0.35	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	35	0.32～0.40	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	40	0.37～0.45	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	45	0.42～0.50	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	50	0.47～0.55	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	55	0.52～0.60	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	60	0.57～0.65	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	65	0.62～0.70	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	70	0.67～0.75	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	75	0.72～0.80	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	80	0.77～0.85	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
	85	0.82～0.90	0.17～0.37	0.50～0.80	0.040	0.040	0.25	0.25
较高含锰量钢	15 Mn	0.12～0.19	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	20 Mn	0.17～0.24	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	25 Mn	0.22～0.30	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	30 Mn	0.27～0.35	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	35 Mn	0.32～0.40	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	40 Mn	0.37～0.45	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	45 Mn	0.42～0.50	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	50 Mn	0.48～0.56	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	60 Mn	0.57～0.65	0.17～0.37	0.70～1.00	0.040	0.040	0.25	0.25
	65 Mn	0.62～0.70	0.17～0.37	0.90～1.20	0.040	0.040	0.25	0.25
	70 Mn	0.67～0.75	0.17～0.37	0.90～1.20	0.040	0.040	0.25	0.25

表 3.1.4-5

优质碳素结构钢机械性能

钢号	屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k	硬度 HB 热轧钢	硬度 HB 退火钢	用途
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(J/cm²)			
	≥	≥	≥	≥		≤	≤	
05 F								条钢冷冲和薄板深模冲的零件
08 F 08	177 196	294 324	35 33	60 60	— —	131 131	— —	管子、垫片；心部强度要求不高的渗碳和氰化零件；套筒、短轴、离合器盘等
10 F	186	314	33	55	—	137	—	同 08、08 F
10	206	333	31	55	—	137	—	作拉杆、卡头、垫片、铆钉等

钢号	屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k	硬度 HB		用　　途
	(MPa)		(%)		(J/cm²)	热轧钢	退火钢	
	≥					≤		
15 F	206	353	29	55	—	143	—	同 08、08 F；还可作吊钩、螺栓等
15	226	373	27	55	—	143	—	渗碳零件、紧固件、螺栓、螺钉、拉条、法兰盘及蒸汽锅炉
20 F	226	383	27	55	—	156	—	同 15 F
20	245	412	25	55	—	156	—	杠杆、轴套、螺钉、起重钩等以及渗碳零件
25	275	451	23	50	90	170	—	性能与 20 钢相似，用于制造焊接设备以及不承受高应力的零件，如轴、辊子、连接器、垫圈、螺栓等
30	294	490	21	50	80	179	—	用于制造螺钉、拉杆、轴、套筒、机座。截面不大时，淬火并回火可获得良好强韧性的索氏体组织
35	314	530	20	45	70	187	—	用于制造曲轴、转轴、杠杆、连杆、齿轮、圆盘、套筒、钩环、飞轮、机身、法兰、螺栓、螺母等
40	333	569	19	45	60	217	187	多在正火和调质状态下使用，可表面淬火。用于制造辊子、轴、曲柄销、活塞杆、圆盘等
45	353	598	16	40	50	241	197	用于制造齿轮、齿条、链轮、轴、键、销、蒸气透平机的叶轮、压缩机及泵的零件，轧辊等
50	373	628	14	40	40	241	207	用于耐磨性要求较高，动载荷及冲击不大的零件，齿轮、拉杆、轧辊、轴、摩擦盘、次要弹簧等
55	383	647	13	35	—	255	217	用于制造齿轮、连杆、轮圈、轮缘、扁弹簧及轧辊等，也用于生产铸件
60	402	677	12	35	—	255	229	用于制造轧辊、轴、弹簧、垫圈、离合器、凸轮等
65	412	696	10	30	—	255	229	主要用于汽门弹簧、弹簧圈、轴、轧辊、各种垫圈、凸轮等
70	422	716	9	30	—	269	229	适于制造截面不大的弹簧，主要用于扁弹簧、圆弹簧、钢丝、钢带
75	883	1079	7	30	—	285	241	用于制造板弹簧、螺旋弹簧、受磨损的零件
80	932	1079	6	30	—	285	241	板弹簧、螺旋弹簧、受磨损的零件

续上表

钢号	屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k	硬度 HB		用　　途
	(MPa)		(%)		(J/cm²)	热轧钢	退火钢	
	≥					≤		
85	981	1128	6	30	—	302	255	用于制造机械扁形板簧、圆形螺旋弹簧、钢丝和钢带等。
15 Mn	245	412	26	55	—	163	—	用以制造心部机械性能较高的渗碳零件
20 Mn	275	451	24	50	—	197	—	高锰低碳渗碳钢。可做凸轮轴、齿轮、联轴器、铰链、拖杆等
25 Mn	294	490	22	50	90	207	—	可做渗碳和焊接零件：凸轮轴、齿轮、联轴器、铰链、销、拖杆等
30 Mn	314	539	20	45	80	217	187	用以制造螺栓、螺母、螺钉、杠杆、链等
35 Mn	333	559	18	45	70	229	197	受磨损的零件：转轴、心轴、齿轮、叉、啮合杆、螺栓、螺母、螺钉。
40 Mn	353	588	17	45	60	229	207	用以制造承受疲劳负荷的零件，如轴辊子及高应力下工作的螺钉、螺母等
45 Mn	373	618	15	40	50	241	217	受磨损的零件、轮轴、心轴、齿轮、啮合杆、螺栓、螺母。还可做离合器盘、花键轴、万向节、凸轮轴、曲轴等
50 Mn	392	647	13	40	40	255	217	用于制造耐磨性要求高的零件，如齿轮、齿轮轴、摩擦盘和 80 毫米以下的心轴等
60 Mn	412	696	11	35	—	269	229	适于制造螺旋弹簧、板簧，各种扁、圆弹簧，弹簧环、片，及冷拔钢丝（≤7 mm）和发条
65 Mn	432	736	9	30	—	285	229	适于制造较大尺寸的各种扁、圆弹簧，如阀、活塞、油头弹簧等以及其他经受摩擦的零件
70 Mn	451	785	8	30	—	285	229	弹簧圈、盘簧、止推环、离合器盘、锁紧圈

注：①做拉力或冲击韧性试验用的试样毛坯，必须从直径或厚度为 25 mm 经热处理后的毛坯上切取，一般拉力试样毛坯应进行正火处理。冲击韧性及 75、80 和 85 号钢的拉力试样毛坯应进行调质处理。对直径或厚度小于 25 mm的钢材热处理是在与成品截面尺寸相同的试样毛坯上进行。

② 75、80 和 85 号钢做拉力试样毛坯热处理制度建议如下：820℃ 油中冷却并 480℃ 回火。

③做冲击韧性试验用的试样毛坯在水中淬火（45 Mn和 50 Mn在油中淬火），淬火后的回火温度建议为 600℃。

④所规定的机械性能是纵向的，并适用于直径或厚度不大于 80 mm的钢材，对大于 80 mm的钢材，允许其伸长率及断面收缩率较规定值各降低 2%（绝对的）及 5%（绝对的）。

2 普通低合金结构钢

普通低合金结构钢中合金元素含量较低，其屈服强度比碳素钢高，时效倾向小，并具有良好的焊接性和耐蚀性。这类钢一般在热轧和正火状态下使用，生产过程简单、成本低廉。使用普通低合金钢代替普通碳素钢可以节省钢材 20%～30%以上，可以使船机机构得到改善，减轻自重，提高可靠性，耐久性和载运量。

采用合金元素控制晶粒大小是普通低合金结构钢重要强化手段之一，细化晶粒能在提高强度的同时提高脆性转变温度，提高韧性。提高普通低合金钢强度的另一途径，是采用低碳低合金钢淬火获得低碳马氏体，然后进行高温回火，以获得良好的综合机械性能和焊接性能的低碳索氏体组织。

低合金结构钢技术条件（GB 1591—79）适用于热轧低合金结构钢板及型钢。其化学成分也适用于钢锭、钢坯及其制品。化学成分见表 3.1.4-6；机械性能见表 3.1.4-7。

表 3.1.4-6　　**低合金结构钢化学成分**

钢　号	化　学　成　分　(%)										
	C	Mn	Si	P	S	V	Ti	Nb	Cu	N	Xt
09 MnV	≤0.12	0.80～1.20	0.20～0.60	≤0.045		0.04～0.12					
09 MnNb	≤0.12	0.80～1.20	0.20～0.60	≤0.045				0.015～0.050			
(09 Mn 2)①	≤0.12	1.40～1.80	0.20～0.50	≤0.045							
12 Mn	0.09～0.16	1.10～1.50	0.20～0.60	≤0.045							
18 Nbb	0.14～0.22	0.40～0.65	≤0.17	≤0.045				0.015～0.050			
09 MnCuPTi	≤0.12	1.00～1.50	0.20～0.50	0.05～0.12			≤0.03		0.20～0.40		
10 MnSiCu	≤0.12	1.30～1.65	0.80～1.10	≤0.045					0.15～0.30		
12 MnV	≤0.15	1.00～1.40	0.20～0.60	≤0.045	≤0.050	0.04～0.12					
12 MnPXt	≤0.16	0.60～1.00	0.20～0.60	0.07～0.12							≤0.20
14 MnNb	0.12～0.18	0.80～1.20	0.20～0.60	≤0.045				0.015～0.050			
16 Mn	0.12～0.20	1.20～1.60	0.20～0.60	≤0.045							
16 MnXt	0.12～0.20	1.20～1.60	0.20～0.60	≤0.045							≤0.20
10 MnPNbXt	≤0.14	0.80～1.20	0.20～0.60	0.06～0.12				0.015～0.050			≤0.20

钢　号	化　学　成　分　(%)										
	C	Mn	Si	P	S	V	Ti	Nb	Cu	N	Xt
15 MnV	0.12~0.18	1.20~1.60	0.20~0.60	≤0.045		0.04~0.12					
15 MnTi	0.12~0.18	1.20~1.60	0.20~0.60	≤0.045			0.12~0.20				
16 MnNb	0.12~0.20	1.00~1.40	0.20~0.60	≤0.045	≤0.050			0.015~0.050			
14 MnVTiXt	≤0.18	1.30~1.60	0.20~0.60	≤0.045		0.04~0.10	0.09~0.16				≤0.20
15 MnVN	0.12~0.20	1.30~1.70	0.20~0.60	≤0.045		0.10~0.20				0.010~0.020	

钢号加括号者为不推荐钢号。

表 3.1.4-7　　　　**低合金结构钢机械性能**

钢　号	钢材厚度或直　径(mm)	屈服强度 δ_s	抗拉强度 δ_b	伸长率 δ_5	180 度冷弯试验 *d*＝弯心直径 *a*＝试样厚度	用　途
		(MPa)		(%)		
		≥				
09 MnV	≤16 17~25	294 275	432 432	22 22	d＝2 a d＝3 a	适用于作冲压件及中、低压容器
09 MnNb	≤16 17~25	294 275	412 392	23 21	d＝2 a d＝3 a	可代替 09 Mn 2 作冲压件
(09 Mn 2)	≤16 17~30 32~100 方、圆钢	294 275 255	441 422 412	21 21 21	d＝2 a d＝3 a d＝3 a	适于制造海运油船、油罐、压力容器等。必要时可代 09 MnV 作－70℃ 用钢
12 Mn	≤16 17~25 26~36 38~50 55~100 方、圆钢	294 275 255 235 235	441 432 402 392 392	21 19 19 19 19	d＝2 a d＝3 a d＝3 a d＝3 a d＝3 a	可代 A3、20 g、09 Mn 2 Si 制造低压锅炉，同时可代 09 Mn 2 和 09 Mn 2 Si 制造容器、油罐、船体结构等
18 Nbb	6~16	294	412	21	d＝2 a	制作中、低压容器
09 MnCuPTi	≤16 17~25	343 333	490 490	21 19	d＝2 a d＝3 a	耐腐蚀性好，用于制作容器
10 MnSiCu	4~10 11~20 21~32	343 333 324	490 471 471	21 21 21	d＝2 a d＝2 a d＝3 a	
12 MnV	≤16 17~25	343 333	490 490	21 19	d＝2 a d＝3 a	同 12 Mn
12 MnPXt	6~12	343	510	21	d＝2 a	同 12 Mn，耐腐蚀性较好
14 MnNb	≤16 17~25	353 333	490 471	20 18	d＝2 a d＝3 a	用于制造－20~450℃ 的容器、船舶焊接机构

续上表

钢号	钢材厚度或直径(mm)	屈服强度 δ_s	抗拉强度 δ_b	伸长率 δ_5	180度冷弯试验 d=弯心直径 a=试样厚度	用途
		(MPa)		(%)		
		≥				
16 Mn	≤16 17~25 26~36 38~50 55~100 方、圆钢	343 324 314 294 275	510 490 471 471 471	21 19 19 19 19	d=2 a d=3 a d=3 a d=3 a d=3 a	用于制造-40~450℃船舶、锅炉、大型容器和管道、机舱结构等
16 MnXt	≤16 17~25	343 324	510 490	21 19	d=2 a d=3 a	同16 Mn，冲击韧性、冷弯性能优于16 Mn
10 MnPNbXt	≤10	392	510	19	d=2 a	耐海水腐蚀，用于船体结构、海港建筑、焊接机架、机座等
15 MnV	<5 5~16 17~25 26~36 38~50	412 392 373 353 333	549 530 510 490 490	19 18 17 17 17	d=2 a d=3 a d=3 a d=3 a d=3 a	用于制造-20~450℃中高压锅炉，高压容器，起重运输机械及其型材、管材可代替正火的15 MnTi使用
15 MnTi	≤25 26~40	392 373	530 510	19 19	d=3 a d=3 a	同16 Mn，有优良的抗脆裂能力
16 MnNb	≤16 17~20	392 373	530 510	19 18	d=2 a d=3 a	同16 Mn
14 MnVTiXt	≤12 13~20	441 412	549 530	18 18	d=2 a d=3 a	用于制造船舶、船体结构、焊接机架及机座、电站设备、起重机械等
15 MnVN	≤10 11~25 26~38 40~50	441 422 412 392	588 569 549 530	17 18 17 17	d=2 a d=3 a d=3 a d=3 a	用于锅炉、高压容器、船体结构、焊接机架、机座及油船油罐等

注：①15 MnTi、14 MnVTiXt、15 MnVN钢的机械性能是指热处理状态的。若按热轧状态交货，则试样须经热处理，并在质量证明书中注明热处理制度。

②根据需方要求，可以进行冲击韧性试验。常温冲击值不小于60 J/cm²；-40℃低温冲击值应不小于30 J/cm²（18 Nbb除外）。

③经供需双方协议，16 Mn钢（包括16 MnCu、16 MnXt、16 MnCuXt）可比表中规定的屈服、抗拉强度各降低20 MPa。

3 合金结构钢

合金结构钢在化学成分方面对有害元素杂质限制较严，由于加入合金元素提高了钢的强韧性、淬透性和疲劳强度。

钢中锰含量一般在1%~2%范围内，钢中加入锰可以显著地提高淬透性。但锰钢有明显的过热倾向，因此应严格控制加热温度和加热时间。

铬钢具有较高的淬透性和良好的综合机械性能。15 Cr、20 Cr等是渗碳钢，用于制造要求较高强度和耐磨损的零件。40 Cr是一种广泛使用的钢。铬钢中加入少量钒、钼等元素有利于提高韧性、塑性和回火稳定性。38 CrMoAl是一种典型的氮化钢，用于制造要求特别耐磨的机器零件。

在钢中同时加入铬和镍，既强烈提高淬透性又提高强度、塑性和韧性，适于制造要求机械性能较高的大截面零件。我国已发展硅锰钢、硼钢及含稀土元素的钢以代替铬镍钢。

合金结构钢(GB 3077—82)标准适用于热轧、锻制的直径或厚度到250 mm的合金结构钢条钢。其化学成分也适用于锭、坯及其制品。化学成分见表3.1.4-8；机械性能见表3.1.4-9。

表3.1.4-8　**合金结构钢化学成分**

钢号	化学成分(%)					
	C	Si	Mn	Mo	Cr	其它
20 Mn 2	0.17~0.24	0.17~0.37	1.40~1.80			
30 Mn 2	0.27~0.34	0.17~0.37	1.40~1.80			
35 Mn 2	0.32~0.39	0.17~0.37	1.40~1.80			
40 Mn 2	0.37~0.44	0.17~0.37	1.40~1.80			
45 Mn 2	0.42~0.49	0.17~0.37	1.40~1.80			
50 Mn 2	0.47~0.55	0.17~0.37	1.40~1.80			
20 MnV	0.17~0.24	0.17~0.37	1.30~1.60			V 0.07~0.12
30 Mn 2 MoW	0.27~0.34	0.17~0.37	1.70~2.00	0.40~0.50		W 0.60~1.00
27 SiMn	0.24~0.32	1.10~1.40	1.10~1.40			
35 SiMn	0.32~0.40	1.10~1.40	1.10~1.40			
42 SiMn	0.39~0.45	1.10~1.40	1.10~1.40			
20 SiMn 2 MoV	0.17~0.23	0.90~1.20	2.20~2.60	0.30~0.40		V 0.05~0.12
25 SiMn 2 MoV	0.22~0.28	0.90~1.20	2.20~2.60	0.30~0.40		V 0.05~0.12
37 SiMn 2 MoV	0.33~0.39	0.60~0.90	1.60~1.90	0.40~0.50		V 0.05~0.12
40 B	0.37~0.44	0.17~0.37	0.60~0.90			B 0.0005~0.0035
45 B	0.42~0.49	0.17~0.37	0.60~0.90			B 0.0005~0.0035
50 B	0.47~0.55	0.17~0.37	0.60~0.90			B 0.0005~0.0035
40 MnB	0.37~0.44	0.17~0.37	1.10~1.40			B 0.0005~0.0035
45 MnB	0.42~0.49	0.17~0.37	1.10~1.40			B 0.0005~0.0035
20 Mn 2 B	0.17~0.24	0.17~0.37	1.50~1.80			B 0.0005~0.0035
20 MnMoB	0.16~0.22	0.17~0.37	0.90~1.20	0.20~0.30		B 0.0005~0.0035
15 MnVB	0.12~0.18	0.17~0.37	1.20~1.60			V 0.07~0.12 B 0.0005~0.0035
20 MnVB	0.17~0.23	0.17~0.37	1.20~1.60			V 0.07~0.12 B 0.0005~0.0035
40 MnVB	0.37~0.44	0.17~0.37	1.10~1.40			V 0.05~0.10 B 0.0005~0.0035
20 MnTiB	0.17~0.24	0.17~0.37	1.30~1.60			Ti 0.04~0.10 B 0.0005~0.0035
25 MnTiBXt	0.22~0.28	0.20~0.45	1.30~1.60			Ti 0.04~0.10 B 0.0005~0.0035 Xt 0.05
20 SiMnVB	0.17~0.24	0.50~0.80	1.30~1.60			V 0.07~0.12 B 0.0005~0.0035
15 Cr	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70		0.70~1.00	
20 Cr	0.17~0.24	0.17~0.37	0.50~0.80		0.70~1.00	
30 Cr	0.27~0.34	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	
35 Cr	0.32~0.39	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	
40 Cr	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	
45 Cr	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	
50 Cr	0.47~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	

续上表

钢号	化学成分(%)					
	C	Si	Mn	Mo	Cr	其它
38 CrSi	0.35~0.43	1.00~1.30	0.30~0.60		1.30~1.60	
12 CrMo	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.55	0.40~0.70	
15 CrMo	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.55	0.80~1.10	
20 CrMo	0.17~0.24	0.17~0.37	0.40~0.70	0.15~0.25	0.80~1.10	
30 CrMo	0.26~0.34	0.17~0.37	0.40~0.70	0.15~0.25	0.80~1.10	
35 CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.15~0.25	0.80~1.10	
42 CrMo	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.15~0.25	0.90~1.20	
12 CrMoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.25~0.35	0.30~0.60	V 0.15~0.30
35 CrMoV	0.30~0.38	0.17~0.37	0.40~0.70	0.20~0.30	1.00~1.30	V 0.10~0.20
12 Cr 1 MoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.25~0.35	0.90~1.20	V 0.15~0.30
25 Cr 2 MoVA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.40~0.70	0.25~0.35	1.50~1.80	V 0.15~0.30
25 Cr 2 Mo 1 VA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	0.90~1.10	2.10~2.50	V 0.30~0.50
20 Cr 3 MoWVA	0.17~0.24	0.17~0.37	0.30~0.60	0.35~0.50	2.60~3.00	V 0.70~0.90 W 0.30~0.60
38 CrMoAl	0.35~0.42	0.20~0.45	0.30~0.60	0.15~0.25	1.35~1.65	Al 0.70~1.10
20 CrV	0.17~0.23	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	V 0.10~0.20
40 CrV	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	V 0.10~0.20
50 CrVA	0.47~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80		0.80~1.10	V 0.10~0.20
15 CrMn	0.12~0.18	0.17~0.37	1.10~1.40		0.40~0.70	
20 CrMn	0.17~0.23	0.17~0.37	0.90~1.20		0.90~1.20	
40 CrMn	0.37~0.45	0.17~0.37	0.90~1.20		0.90~1.20	
20 CrMnSi	0.17~0.23	0.90~1.20	0.80~1.10		0.80~1.10	
25 CrMnSi	0.22~0.29	0.90~1.20	0.80~1.10		0.80~1.10	
30 CrMnSi	0.27~0.34	0.90~1.20	0.80~1.10		0.80~1.10	
35 CrMnSiA	0.32~0.39	1.10~1.40	0.80~1.10		1.10~1.40	
20 CrMnMo	0.17~0.23	0.17~0.37	0.90~1.20	0.20~0.30	1.10~1.40	
40 CrMnMo	0.37~0.45	0.17~0.37	0.90~1.20	0.20~0.30	0.90~1.20	
20 CrMnTi	0.17~0.23	0.17~0.37	0.80~1.10	1.00~1.30	1.00~1.30	Ti 0.04~0.10
30 CrMnTi	0.24~0.32	0.17~0.37	0.80~1.10	1.00~1.30	1.00~1.30	Ti 0.04~0.10
20 CrNi	0.17~0.23	0.17~0.37	0.40~0.70		0.45~0.75	Ni 1.00~1.40
40 CrNi	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80		0.45~0.75	Ni 1.00~1.40
45 CrNi	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.80		0.45~0.75	Ni 1.00~1.40
50 CrNi	0.47~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80		0.45~0.75	Ni 1.00~1.40
12 CrNi2	0.10~0.17	0.17~0.37	0.30~0.60		0.60~0.90	Ni 1.50~2.00
12 CrNi3	0.10~0.17	0.17~0.37	0.30~0.60		0.60~0.90	Ni 2.75~3.25
20 CrNi3	0.17~0.24	0.17~0.37	0.30~0.60		0.60~0.90	Ni 2.75~3.25
30 CrNi3	0.27~0.34	0.17~0.37	0.30~0.60		0.60~0.90	Ni 2.75~3.25
37 CrNi3	0.34~0.41	0.17~0.37	0.30~0.60		1.20~1.60	Ni 3.00~3.50
12 Cr 2 Ni 4	0.10~0.17	0.17~0.37	0.30~0.60		1.25~1.75	Ni 3.25~3.75
20 Cr 2 Ni 4	0.17~0.23	0.17~0.37	0.30~0.60		1.25~1.75	Ni 3.25~3.75
20 CrNiMo	0.17~0.23	0.17~0.37	0.60~0.95	0.20~0.30	0.40~0.70	Ni 0.35~0.75
40 CrNiMoA	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.15~0.25	0.60~0.90	Ni 1.25~1.75
45 CrNiMoVA	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.80	0.20~0.30	0.80~1.10	V 0.10~0.20 Ni 1.30~1.80
18 Cr 2 Ni 4 WA	0.13~0.19	0.17~0.37	0.30~0.60		1.35~1.65	W 0.80~1.20 Ni 4.00~4.50
25 Cr 2 Ni 4 WA	0.21~0.28	0.17~0.37	0.30~0.60		1.35~1.65	W 0.80~1.20 Ni 4.00~4.50

表 3.1.4-9 合金结构钢机械性能

钢号	试样毛坯尺寸(mm)	热处理					机械性能					布氏硬度压痕直径(mm) ≤	用途
		淬火			回火		抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k		
		温度(℃)		冷却剂	温度(℃)	冷却剂	(MPa)		(%)		(J/cm²)		
		第一次淬火	第二次淬火				≥						
20 Mn 2	15	850 880	—	水、油 水、油	200 440	水、空 水、空	785	588	10	40	60	4.4	一般在较小断面零件与 20 Cr 相当，可作渗碳小齿轮、小轴、钢套、活塞销、缸套、气门推杆等
30 Mn 2	25	840	—	水	500	水	785	637	12	45	80	4.2	调质钢用，如冷墩螺栓或较大截面调质零件
35 Mn 2	25	840	—	水	500	水	834	686	12	45	70	4.2	一般在较小断面零件与 40 Cr 相当，各种重要螺栓以及小轴、曲柄等
40 Mn 2	25	840	—	水	540	水	883	736	12	45	70	4.1	在直径 50 mm以下可代 40 Cr 作重要螺栓与零件
45 Mn 2	25	840	—	油	550	水、油	883	736	10	45	60	4.1	同 40 Mn 2
50 Mn 2	25	820	—	油	550	水、油	932	785	9	40	50	4.0	用于花键轴，重型机械内齿轮，齿轮轴等
20 MnV	15	880	—	水、油	200	水、空	785	588	10	40	70	4.4	相当于 20 CrNi 的渗碳钢
30 Mn 2 MoW	25	900	—	油	610	水、油	981	834	12	50	90	3.7	可代替 30 CrNi 4 MoA 30 CrNi 3 及 25 CrNiWA 钢制造轴及杆类调质件
27 SiMn	25	920	—	水	450	水、油	981	834	12	40	50	4.1	调质钢用
35 SiMn	25	900	—	水	570	水、油	883	736	15	45	60	4.0	除了要求低温(−20℃以下)冲击韧性很高的情况外可以全面代替 40 Cr 作调质钢，亦可部分代替 40 CrNi，适用于作齿轮、轴以及 430℃以下的重要紧固件
42 SiMn	25	880	—	水	590	水	883	736	15	40	60	4.0	同 35 SiMn，专供表面淬火用
20 SiMn 2 MoV	试样	900	—	油	200	水、空	1373	—	10	45	70	3.7	可代替 12 Cr 2 Ni 4 A 钢制造喷油器偶件
25 SiMn 2 MoV	试样	900	—	油	200	水、空	1471	—	10	40	60	3.7	可代 20 CrMnTi 钢做渗碳零件

续上表

钢号	试样毛坯尺寸(mm)	热处理					机械性能					布氏硬度压痕直径(mm) ≤	用途
		淬火			回火		抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k		
		温度(℃) 第一次淬火	温度(℃) 第二次淬火	冷却剂	温度(℃)	冷却剂	(MPa) ≥		(%) ≥		(J/cm²) ≥		
37 SiMn 2 MoV	25	870	—	水、油	650	水、空	981	834	12	50	80	3.7	制造大截面承受重载荷的轴、连杆、齿轮及高强度曲轴、蜗杆等，代 34 CrNiMo
40 B	25	840	—	水	550	水	785	637	12	45	70	4.2	比 40 号优质碳素钢的淬透性及强度稍高，可做稍大些截面的机件
45 B	25	840	—	水	550	水	834	687	12	45	60	4.1	比 45 号优质碳素钢的淬透性及强度稍高可做稍大些截面的机件
50 B	20	840	—	油	600	空	785	539	10	45	50	4.2	用于制造齿轮、凸轮、轴、转向拉杆等
40 MnB	25	850	—	油	500	水、油	981	785	10	45	60	4.2	性能接近 40 Cr，用作调质钢
45 MnB	25	840	—	油	500	水、油	1030	834	9	40	50	4.1	性能接近 45 Cr，用作调质钢
20 Mn 2 B	15	880	—	油	200	水、空	981	785	10	45	70	4.4	可代 20 Cr钢作渗碳零件
20 MnMOB	15	880	—	油	200	油、空	1079	883	10	50	70	4.2	可代 20 CrMnTi 钢作渗碳零件
15 MnVB	15	860	—	油	200	水、空	883	637	10	45	70	4.2	制作渗碳零件
20 MnVB	15	860	—	油	200	水、空	1079	883	10	45	70	4.2	同 20 MnMoB
40 MnVB	25	850	—	油	520	水、油	981	785	10	45	60	4.2	性能略优于 40 Cr，用作调质钢
20 MnTiB	15	860	—	油	200	水、空	1128	932	10	45	70	4.4	可代 20 CrMnTi、20 CrNi 钢制造较高级渗碳齿轮、中等负荷的活塞销、十字头销、凸轮等
25 MnTiBXt	试样	860	—	油	200	水、空	1373	—	10	40	60	4.2	
20 SiMnVB	15	900	—	油	200	水、空	1177	981	10	45	70	4.2	同 20 MnMoB

续上表

钢号	试样毛坯尺寸(mm)	热处理					机械性能					布氏硬度压痕直径(mm) ≤	用途
		淬火			回火		抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k		
		温度(℃)		冷却剂	温度(℃)	冷却剂	(MPa)		(%)		(J/cm²)		
		第一次淬火	第二次淬火				≥						
15 Cr	15	880	800	水、油	200	水、空	736	490	11	45	70	4.5	船舶主机用螺钉、活塞销、凸轮、凸轮轴、汽轮机套环等。制作心部韧性高的渗碳零件
20 Cr	15	880	800	水、油	200	水、空	834	539	10	40	60	4.5	柴油机活塞销、凸轮轴、蜗杆顶杆、齿轮，较重要的渗碳件
30 Cr	25	860	—	油	500	水、油	883	687	11	45	60	4.4	制造螺栓等重要调质机件
35 Cr	25	860	—	油	500	水、油	932	736	11	45	60	4.2	制造齿轮、轴及各种滚子
40 Cr	25	850	—	油	520	水、油	981	785	9	45	60	4.2	用于较重要的调质零件，如重要螺栓，连杆、进气阀、重要齿轮、轴、曲轴、曲柄、汽轮发电机环形锻件等
45 Cr	25	840	—	油	520	水、油	1030	834	9	40	50	4.1	用于离合器、齿轮、柴油机连杆、螺栓、挺杆
50 Cr	25	830	—	油	520	水、油	1079	932	9	40	50	4.0	支承辊心轴，要求高强度或耐磨性的轴或轴齿轮，油膜轴承套等
38 CrSi	25	900	—	油	600	水、油	981	834	12	50	70	3.8	用于制造进气阀，内燃机油泵齿轮
12 CrMo	30	900	—	空	650	空	419	265	24	60	140	4.5	蒸汽温度达 510℃ 的主汽管，管壁温度≤540℃ 的蛇形管、导管
15 CrMo	30	900	—	空	650	空	441	294	22	60	120	4.5	蒸汽温度达 510℃ 的主汽管，管壁温度≤530℃ 的各种蛇形管、导管的相应锻件
20 CrMo	15	880	—	水、油	550	水、油	883	687	12	50	100	4.3	较高级渗碳用钢
30 CrMo	25	880	—	水、油	540	水、油	932	785	12	50	80	4.0	锅炉上温度小于 480℃ 的紧固件，适于 500℃ 以下受高压的法兰和螺栓，尤其适用于 300 大气压 400℃ 以上的管道

续上表

钢号	试样毛坯尺寸(mm)	热处理					机械性能					布氏硬度压痕直径(mm) ≤	用途
		淬火			回火		抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k		
		温度(℃)		冷却剂	温度(℃)	冷却剂	(MPa)		(%)		(J/cm²)		
		第一次淬火	第二次淬火				≥						
35 CrMo	25	850	—	油	550	水、油	981	834	12	45	80	4.0	代 40 CrNi 做大断面齿轮与轴，汽轮发电机转子，锅炉上温度小于 480℃ 的紧固件
42 CrMo	25	850	—	油	560	水、油	1079	932	12	45	80	4.1	一般可代含镍较高的调质钢，制造大截面高强度齿轮、轴、汽轮机转子等
12 CrMoV	30	970	—	空	750	空	441	226	22	50	100	3.9	汽轮机隔板、隔板外环、主汽管、转向导叶环
35 CrMoV	25	900	—	油	630	水、油	1079	932	10	50	90	3.9	蜗轮鼓风机及压缩机转子，盖盘、轴盘。用作 500℃ 以下的叶轮及较大尺寸、较高强度的锻件
12 Cr 1 MoV	30	970	—	空	750	空	490	245	22	50	90	4.5	蒸汽参数到 540℃，管壁温度<570℃ 的各种蛇形管及导管和相应锻件
25 Cr 2 MoVA	25	900	—	油	640	空	932	785	14	55	80	3.9	汽轮机整体转子套筒，阀、主汽阀、调节阀，蒸汽参数到 535℃ 和小于 550℃ 的螺母及小于 530℃ 的螺栓
25 Cr 2 Mo 1 VA	25	1040	—	空	700	空	736	588	16	50	60	3.9	汽轮机前汽缸、螺栓、阀杆，蒸汽参数 565℃
20 Cr 3 MoWVA	25	1050	—	空、油	720	水、油	785	637	14	40	70	4.0	高压抗氢用钢，满足 700 大气压设备。用于工作温度在 550℃ 以下的转子，端轴和轮盘以及其他要求热强性的零件如阀杆、阀蝶等
38 CrMoAl	30	940	—	水、油	640	水、油	981	834	14	50	90	4.0	要求渗氮零件，如高压阀门、阀杆、柴油机喷油器偶件等

续上表

钢号	试样毛坯尺寸(mm)	热处理 淬火 温度(℃) 第一次淬火	第二次淬火	冷却剂	回火 温度(℃)	冷却剂	机械性能 抗拉强度 σ_b (MPa) ≥	屈服强度 σ_s (MPa) ≥	伸长率 δ_5 (%) ≥	断面收缩率 ψ (%) ≥	冲击值 a_k (J/cm²) ≥	布氏硬度压痕直径(mm) ≤	用途
20 CrV	15	880	800	水、油	200	水、空	834	588	12	45	70	4.3	汽轮机用螺母
40 CrV	25	880	—	油	650	水、油	883	736	10	50	90	3.9	高压锅炉给水泵轴，拉紧丝对螺栓(420℃, 360 大气压)，连杆
50 CrVA	25	860	—	油	500	水、油	1275	1128	10	40	—	3.8	蒸汽工作温度 400℃以下的重要零件、大型弹簧、活塞弹簧、气阀弹簧等
15 CrMn	15	880	—	油	200	水、空	785	588	12	50	60	4.5	汽轮机密封轴套
20 CrMn	15	850	—	油	200	水、空	932	736	10	45	60	4.4	机械无级变速装置摩擦轮、齿轮与轴，性能相当 20 CrNi
40 CrMn	25	840	—	油	550	水、油	981	834	9	45	60	4.0	可代替 35 CrMo，部分代替 42 CrMo。制做断面不太大或温度不高的零部件
20 CrMnSi	25	880	—	油	480	水、油	785	637	12	45	70	4.2	高强度构件，可焊接性较好
25 CrMnSi	25	880	—	油	480	水、油	1079	883	10	40	50	4.1	同 20 gMnSi，可以焊接
30 CrMnSi	25	880	—	油	520	水、油	1079	883	10	45	50	4.0	高强度钢，高压鼓风机的压缩叶片，高速负荷砂轮轴等。
35 CrMnSiA	试样	880	— 880 于 280～320 等温淬火	油	230	水、空	1618	—	9	40	50	4.0	高强度钢，高压鼓风机叶轮，飞机上高强度零件
20 CrMnMo	15	850	—	油	200	水、空	1177	883	10	45	70	4.1	高级渗碳钢一般可代含 Ni 较高的渗碳钢，制造传动齿轮、活塞销、球头销、十字头销、凸轮等

续上表

钢号	试样毛坯尺寸(mm)	热处理					机械性能					布氏硬度压痕直径(mm) ≤	用途
		淬火			回火		抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k		
		温度(℃) 第一次淬火	温度(℃) 第二次淬火	冷却剂	温度(℃)	冷却剂	(MPa) ≥	(MPa) ≥	(%) ≥	(%) ≥	(J/cm²) ≥		
40 CrMnMo	25	850	—	油	600	水、油	981	785	10	45	80	4.1	相当于 40 CrNiMo高级调质钢。
20 CrMnTi	15	880	870	油	200	水、空	1079	834	10	45	70	4.1	重要齿轮材料，渗碳处理后获得较高强度和韧性，用于制造大负荷齿轮、蜗轮、伞齿轮以及轴类零件等
30 CrMnTi	试样	880	850	油	220	水、空	1471	—	9	40	60	4.0	制造船机上断面较大的重齿轮如主动伞轮、后主齿轮等，以及要求心部强度特高的渗碳齿轮
20 CrNi	25	850	—	水、油	460	水、油	785	588	10	50	80	4.3	用于制造承受较高载荷的渗碳件，如齿轮、轴、键、活塞销、花键轴等
40 CrNi	25	820	—	油	500	水、油	981	785	10	45	70	3.9	制造要求强度高、韧性高的零件，如轴、齿轮、链条、连杆
45 CrNi	25	820	—	油	530	水、油	981	785	10	45	70	3.8	同 40 CrNi
50 CrNi	25	820	—	油	500	水、油	1079	834	8	40	50	3.8	同 40 CrNi
12 CrNi 2	15	860	780	水、油	200	水、空	785	588	12	50	80	4.2	制造尺寸大的齿轮，花键轴、大型压缩机的活塞销等渗碳件
12 CrNi 3	15	860	780	油	200	水、空	932	687	11	50	90	4.1	制造高载荷的渗碳齿轮、小轴及销等
20 CrNi 3	25	830	—	水、油	480	水、油	932	736	11	55	100	3.9	制造大截面高载荷的渗碳件
30 CrNi 3	25	820	—	油	500	水、油	981	785	9	45	80	3.9	制造承受大的载荷零件，如轴，连杆、键及高强度螺栓、螺母等调质件

续上表

钢号	试样毛坯尺寸 (mm)	热处理					机械性能					布氏硬度压痕直径 (mm) ≤	用途
		淬火			回火		抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k		
		温度(℃)		冷却剂	温度 (℃)	冷却剂	(MPa)		(%)		(J/cm²)		
		第一次淬火	第二次淬火				≥						
37 CrNi 3	25	820	—	油	500	水、油	1128	981	10	50	60	3.7	制造大截面高载荷的调质件
12 Cr 2 Ni 4	15	860	780	油	200	水、空	1079	834	10	50	90	3.7	制造高载荷的齿轮等渗碳件
20 Cr 2 Ni 4	15	880	780	油	200	水、空	1177	1079	10	45	80	3.7	制造高载荷大截面的渗碳件
20 CrNiMo	15	850	—	油	200	空	981	785	9	40	60	4.3	同 20 Cr 2 Ni 4
40 CrNiMoA	25	850	—	油	600	水、油	981	834	12	55	100	3.7	制造承受冲击载荷下的高强度零件，如甩头瓦螺栓、传动偏心轴、柴油机的曲轴等
45 CrNiMoVA	试样	860	—	油	460	油	1471	1324	7	35	40	3.7	同 40 CrNiMoA
18 Cr 2 Ni 4 WA	15	950	850	空	200	水、空	1177	834	10	45	100	3.7	用作渗碳钢和调质钢，用于制造连杆、曲轴、减速机轴、重载荷螺栓等
25 Cr 2 Ni 4 WA	25	850	—	油	550	水、油	1079	932	11	45	90	3.7	

4　碳素工具钢

碳素工具钢生产成本较低，易于冷热加工，热处理后具有相当高的硬度，在工作受热不高情况下耐磨性较好，但是红硬性较差，工作温度超过250℃后，硬度和耐磨性迅速下降。这类钢的淬透性低，工具断面尺寸大于15 mm时，水淬后只有表面层得到高的硬度，故不能做大尺寸的刀具。

碳素工具钢标准（GB 1298—77）适用于热轧、锻制、冷拉及银亮碳素工具钢条钢。其化学成分和机械性能见表3.1.4-10。

表3.1.4-10　　　　**碳素工具钢成分和机械性能**

钢　号	化学成分（%）			硬度值			用　途
	C	Mn	Si	退火后硬度 HB≤	淬火温度（℃）及冷却剂	淬火后硬度 HRC≥	
T7	0.65～0.74	≤0.40	≤0.35	187	800～820 水	62	适于作锻模、凿子、锤、小尺寸风动工具、钳工工具和木工工具等
T8	0.75～0.84	≤0.40	≤0.35	187	780～800 水	62	适于作各种木工工具、风动工具、简单模具、冲头、钻、凿、斧、锯条、切削铜料工具等
T8Mn	0.80～0.90	0.40～0.60	≤0.35	187	780～800 水	62	
T9	0.85～0.94	≤0.40	≤0.35	192	760～780 水	62	冲模、冲头、木工工具及其他韧硬兼备的工具等
T10	0.95～1.04	≤0.40	≤0.35	197	760～780 水	62	车刀、刨刀、拉丝模、钻头、丝锥、以及刃口工作不变热的工具如锯、钻、小型冲模、钳工刮刀、锉刀等
T11	1.05～1.14	≤0.40	≤0.35	207	760～780 水	62	
T12	1.15～1.24	≤0.40	≤0.35	207	760～780 水	62	车刀、铣刀、刨刀、钻头、铰刀、丝锥、板牙、刮刀、锉刀及尺寸小的冲模
T13	1.25～1.35	≤0.40	≤0.35	217	760～780 水	62	刮刀、拉丝工具、刻锉刀纹的工具、钻头、雕刻工具和锉刀等

注：碳素工具钢硫含量不大于0.030%，磷含量不大于0.035%；高级优质钢（钢号后加“A”）硫含量不大于0.020%，磷含量不大于0.030%。

5　合金工具钢

合金工具钢为量具刃具用钢，耐冲击工具用钢，冷作模具钢和热作模具钢。合金工具钢中主要合金元素有硅、钼、铬、钨、钒等。

刃具量具合金工具钢中常用的有如9SiCr、CrWMn等。

耐冲击工具钢，用以制造在工作中受震动较大的工具（如风铲、风凿）、剪切工具（如切边模、冲孔模及钳工工具等）。上述工具除可部分选用碳素工具钢外，常用4SiCrV、5CrW2Si等。

冷作模具钢应具有高的硬度、强度、耐磨性和较好的韧性。使用的钢种很广泛，可根据不同使用状况进行选择。如碳素工具钢、铬工具钢（如9Cr12、9Mn2等）、高速钢（如W18 Cr4V 等）、基体钢（如65 Cr4W3Mo 2VNb等）。

热作模具钢主要分为锤锻模具钢（如5CrMnMo 和5CrNiMo）、热挤压模钢（4Cr5MoSiV 等）和压铸模钢（如3Cr2W8V 等）。

合金工具钢标准（GB 1299—77）适用于热轧、锻制、冷拉及银亮合金工具钢条钢，其化学成分同样适用于锭、坯及其制品。其化学成分见表3.1.4-11，机械性能见表3.1.4-12。

表 3.1.4-11 **合金工具钢化学成分**

钢 号	化 学 成 分 (%)					
	C	Si	Mn	Cr	W	其 他
9 SiCr	0.85~0.95	1.20~1.60	0.30~0.60	0.95~1.25		
8 MnSi	0.75~0.85	0.30~0.60	0.80~1.10			
CrMn	1.30~1.50	≤0.40	0.45~0.75	1.30~1.60		
CrW5	1.25~1.50	≤0.40	≤0.40	0.40~0.70	4.50~5.50	
Cr 06	1.30~1.45	≤0.40	≤0.40	0.50~0.70		
Cr 2	0.95~1.10	≤0.40	≤0.40	1.30~1.65		
9 Cr 2	0.80~0.95	≤0.40	≤0.40	1.30~1.70		
V	0.95~1.05	≤0.40	≤0.40			V 0.20~0.40
W	1.05~1.25	≤0.40	≤0.40	0.10~0.30	0.80~1.20	
4 CrW2Si	0.35~0.45	0.80~1.10	≤0.40	1.00~1.30	2.00~2.50	
5 CrW2Si	0.45~0.55	0.50~0.80	≤0.40	1.00~1.30	2.00~2.50	
6 CrW2Si	0.55~0.65	0.50~0.80	≤0.40	1.00~1.30	2.20~2.70	
Cr 12	2.00~2.30	≤0.40	≤0.40	11.50~13.00		
Cr12MnV	1.45~1.70	≤0.40	≤0.40	11.00~12.50		Mo 0.40~0.60 V 0.15~0.30
Cr6WV	1.00~1.15	≤0.40	≤0.40	5.50~7.00	1.10~1.50	V 0.50~0.70
9 Mn2	0.85~0.95	≤0.40	1.70~2.00			
9 Mn2V	0.85~0.95	≤0.40	1.70~2.00			V 0.10~0.25
Mn CrWV	0.95~1.05	≤0.40	1.00~1.30	0.40~0.70	0.40~0.70	V 0.15~0.39
CrWMn	0.90~1.05	≤0.40	0.80~1.10	0.90~1.20	1.20~1.60	
9CrWMn	0.85~0.95	≤0.40	0.90~1.20	0.50~0.80	0.50~0.80	
MnSi	0.95~1.05	0.65~0.95	0.60~0.90			
Cr4W2MoV	1.12~1.25	0.40~0.70	≤0.40	3.50~4.00	1.90~2.60	Mo 0.80~1.20 V 0.80~1.10
6W6Mo5Cr4V	0.55~0.65	≤0.40	≤0.60	3.70~4.30	6.00~7.00	Mo 4.50~5.50 V 0.70~1.10
Cr2Mn2SiWMoV	0.95~1.05	0.60~0.90	1.80~2.30	2.30~2.60	0.70~1.10	Mo 0.50~0.80 V 0.10~0.25
5CrMnMo	0.50~0.60	0.25~0.60	1.20~1.60	0.60~0.90		Mo 0.15~0.30
5CrNiMo	0.50~0.60	≤0.40	0.50~0.80	0.50~0.80		Mo 0.15~0.30 Ni 1.40~1.80
3Cr2W8V	0.30~0.40	≤0.40	≤0.40	2.20~2.70	7.50~9.00	V 0.20~0.50
4SiCrV	0.40~0.50	1.20~1.60	≤0.40	1.30~1.60		V 0.10~0.25
8Cr3	0.75~0.85	≤0.40	≤0.40	3.20~3.80		
5SiMnMoV	0.45~0.55	1.50~1.80	0.50~0.70	0.20~0.40		V 0.20~0.35 Mo 0.30~0.50
4Cr5MoVSi	0.32~0.42	0.80~1.20	≤0.40	4.50~5.50		Mo 1.00~1.50 V 0.30~0.50
4Cr5W2VSi	0.32~0.42	0.80~1.20	≤0.40	4.50~5.50	1.60~2.40	V 0.60~1.00
5Cr4Mo	0.45~0.55	≤0.40	≤0.40	3.40~4.00		Mo 1.40~1.70

表 3.1.4-12 合金工具钢热处理制度和用途

钢　　号	交　货　状　态		试　样　淬　火			用　　途
	硬度　HB	压痕直径 (mm)	淬火温度 (℃)	冷却剂	硬度 HRC ≥	
9SiCr	241～197	3.9～4.3	820～860	油	62	板牙、丝锥、钻头、铰刀、齿轮铣刀、冷冲模、冷轧辊
8MnSi	≤229	≥4.0	800～820	油	60	木工凿子、锯条及其他刀具。
CrMn	241～197	3.9～4.3	800～830	油	61	各种量具、块规刀形样板、平片等
CrW5	285～229	3.6～4.0	800～820	水	65	慢速度切削硬金属用的刀具如铣刀、车刀、刨刀、拉刀、板牙、钻头、丝锥及铰刀等；高压力下工作用的刻刀
Cr06	241～187	3.9～4.4	780～810	水	64	剃刀及刀片、外科用锋利切削刀具、刮刀、刻刀、锉刀
Cr2	229～179	4.0～4.5	830～860	油	62	切削工具、车刀、插刀、铰刀、量具、样板、量规、凸轮销、偏心轮、冷轧辊和拉丝模等
9Cr2	217～179	4.1～4.5	820～850	油	62	用于制造冷轧用的辊、压轧辊、钢印冲孔凿、冷冲模及冲头；木匠工具
V	217～179	4.1～4.5	780～820	水	62	冷冲模、剪子、凿子、风钻、风镐、空心钻(采矿石)模子、冷冲头(螺栓、铆钉)、冷模
W	229～187	4.0～4.4	800～830	水	62	麻花钻、丝锥、铰刀、辊式刀具
4Cr W2Si	217～179	4.1～4.5	860～900	油	53	中应力热锻模
5Cr W2Si	255～207	3.8～4.2	860～900	油	55	手用或风动凿子、空气锤工具、锅炉工具、顶头模及冲头、剪刀（重震动）、切割器（重震动）、混凝土破裂器
6Cr W2Si	285～229	3.6～4.0	860～900	油	57	同上但能凿更硬金属
Cr12	269～217	3.7～4.1	950～1000	油	60	冷冲模冲头、冷切剪刀（硬薄的金属)、钻套、量规、螺纹滚模、冶金粉模、料模、拉丝模、木工切削工具
Cr12 MoV	255～207	3.8～4.2	950～1000	油	58	冷切剪刀、圆锯、切边模、滚边模、缝口模、标准工具与量规、拉丝模、薄金属冲模、螺纹滚模

续上表

钢　　号	交　货　状　态		试　样　淬　火			用　　途
	硬度　HB	压痕直径 (mm)	淬火温度 (℃)	冷却剂	硬度 HRC ≥	
Cr6WV	≤241	≥3.9	960～1020	油或空	60	定型模、钻套、冷冲模、冲头、切边模、压印模、螺纹滚模、剪刀、量规
9Mn2	≤229	≥4.0	760～780	水	62	小冲模、冲模及剪刀、冷压模、雕刻模、料模、各种变形小的量规、样板、丝锥、板牙、铰刀等
9Mn2V	≤229	≥4.0	780～810	油	62	同9Mn2
MnCrWV	≤229	≥4.0	800～820	油	62	同9Mn2
CrWMn	255～207	3.8～4.2	800～830	油	62	板牙、拉刀、量规、形状复杂高精度的冲模
9CrWMn	241～197	3.9～4.3	800～830	油	62	量规、样板
MnSi	229～187	4.0～4.4	800～820	水	61	拔丝模、冷冲模及切削工具
Cr4W2MoV	≤269	≥3.7	960～980 1020～1040	油	60	
6W6Mo5Cr4V	≤269	≥3.7	1180～1200	油	60	
Cr2Mn2 SiWMoV	≤269	≥3.7	840～860	油或空	60	
5CrMnMo	241～197	3.9～4.3	820～850	油		中型锻模
5CrNiMo	241～197	3.9～4.3	830～860	油		
3Cr2W8V	255～207	3.8～4.2	1075～1125	油		高温高应力的铸、锻模、螺钉或铆钉热压模、热剪切刀
4SiCrV	≤229	≥4.0	860～900	油		热锤模、定型冲压模、热切截工具和压印模
8Cr3	255～207	3.8～4.2	850～880	油		
5SiMnMoV	≤217	≥4.1	840～900	油		手用或风动凿子、锅炉工具、锻作工具、重负荷冲头、剪刀、重震动的切割器、铆钉模、冷钻模等
4Cr5MoVSi	≤229	≥4.0	980～1030	油或空		用作铜、铝等金属的压铸模等
4Cr5W2VSi	≤229	≥4.0	1030～1050	油或空		
5Cr4Mo	≤241	≥3.9				

6　高速工具钢

高速工具钢用于制造在比较高的温度下（600℃左右）能保持其切削性能和耐磨性的工具。高速钢中主要的合金元素是钨、钼、铬、钒和钴，属于高合金莱氏体钢。我国广泛使用W18Cr4V，W6Mo5Cr4V2 钢。

高速工具钢标准（YB12-77）适用于热轧、锻制、冷拉及银亮高速工具钢条钢。其化学成分同样适用于锭、坯及其制品。化学成分见表 3.1.4-13。

表 3.1.4-13　　**高速工具钢化学成分**

钢　号	化　学　成　分　(%)									
	C	W	Mo	Cr	V	Si	Mn	Nb	Al	其它
W18Cr4V	0.70~0.80	17.50~19.00	≤0.30	3.80~4.40	1.00~1.40	≤0.40	≤0.40			
9W18Cr4V	0.90~1.00	17.50~19.00	≤0.30	3.80~4.40	1.00~1.40	≤0.40	≤0.40			
W12Cr4V4Mo	1.20~1.40	11.50~13.00	0.90~1.20	3.80~4.40	3.80~4.40	≤0.40	≤0.40			
W14Cr4VMnXt	0.80~0.90	13.50~15.00	≤0.30	3.50~4.00	1.40~1.70	≤0.50	0.35~0.55			Xt 0.07
W6Mo5Cr4V2	0.80~0.90	5.50~6.75	4.50~5.50	3.80~4.40	1.75~2.20	≤0.40	≤0.40			
W6Mo5Cr4V2Al	1.05~1.20	5.50~6.75	4.50~5.50	3.80~4.40	1.75~2.20	≤0.60	≤0.40		0.80~1.20	
W6Mo5Cr4V5SiNbAl	1.55~1.65	5.50~6.50	5.00~6.00	3.80~4.40	4.20~5.20	1.00~1.40	≤0.40	0.20~0.50	0.30~0.70	
W10Mo4Cr4V3Al	1.30~1.45	9.00~10.50	3.50~4.50	3.80~4.50	2.70~3.20	≤0.50	≤0.50		0.70~1.20	
W12Mo3Cr4V3Co5Si	1.20~1.30	11.50~13.50	2.80~3.40	3.80~4.40	2.80~4.40	0.80~1.20	≤0.40			Co 4.70~5.10

注：硫含量均小于 0.030%；磷含量均小于 0.030%。

7　弹簧钢

弹簧是一种广泛使用的机械零件。船机上最常用的有阀弹簧、喷油器弹簧等。弹簧钢应具有高的持久弹性、强度极限和高的屈强比（$\sigma_s/\sigma_b \geq 0.8$），高的疲劳极限和冲击韧性，一定塑性和淬透性，较好的工艺性能。用做弹簧的优质碳素钢，碳含量 0.62%～0.90%，锰含量为 0.15%～0.37%；合金弹簧钢，碳含量 0.46%～0.75%，常加入锰、铬、硅合金元素以及钒、钨、钼、铌等。

弹簧钢通常以热轧状态、退火状态和冷轧、冷拉状态或淬火回火状态供应，其一般成品硬度为 HB285～321。

弹簧钢除了用做各种弹簧外，还可用于制造弹性轴和工模具等。

热轧弹簧钢标准（GB1222—75）适用于热轧圆、方、扁及异型截面弹簧钢材，其化学成分同样适用于锭、坯及其制品。化学成分见表 3.1.4-14，机械性能见表 3.1.4-15。

表 3.1.4-14　　**热轧弹簧钢化学成分**

钢　号	化　学　成　分　(%)								
	C	Si	Mn	Cr	其　它	Ni	Cu	P	S
						≤			
65	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		0.25	0.25	0.040	0.040
70	0.67~0.75	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		0.25	0.25	0.040	0.040

钢号	化学成分(%) C	Si	Mn	Cr	其它	Ni ≤	Cu ≤	P ≤	S ≤
75	0.72~0.80	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		0.25	0.25	0.040	0.040
85	0.82~0.90	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		0.25	0.25	0.040	0.040
65 Mn	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.25		0.25	0.25	0.040	0.040
55Si2Mn	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35		0.35	0.25	0.040	0.040
55Si2MnB	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35	B 0.0005~0.004	0.35	0.25	0.040	0.040
60Si2Mn	0.56~0.64	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35		0.35	0.25	0.040	0.040
60Si2MnA	0.56~0.64	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35		0.35	0.25	0.035	0.030
70Si3MnA	0.66~0.74	2.40~2.80	0.60~0.90	≤0.35		0.35	0.25	0.035	0.030
60Si2CrA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.70~1.00		0.35	0.25	0.035	0.030
65Si2MnWA	0.61~0.69	1.50~2.00	0.70~1.00	≤0.35	W 0.80~1.20	0.35	0.25	0.035	0.030
60Si2CrVA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.90~1.20	V 0.10~0.20	0.35	0.25	0.035	0.030
50CrMn	0.46~0.54	0.17~0.37	0.70~1.00	0.90~1.20		0.35	0.25	0.040	0.040
55SiMnVB	0.52~0.60	0.70~1.00	1.00~1.30	≤0.35	V 0.08~0.16 B 0.001	0.35	0.25	0.040	0.040
50CrVA	0.46~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	V 0.10~0.20 B 0.0035	0.35	0.25	0.035	0.030
30W4Cr2VA	0.26~0.34	0.17~0.37	≤0.40	2.00~2.50	W 4.00~4.50 V 0.50~0.80	0.35	0.25	0.035	0.030
55SiMnMoV	0.52~0.60	0.90~1.20	1.00~1.30	≤0.35	V 0.08~0.15 Mo 0.20~0.30	0.35	0.25	0.040	0.040
55SiMnMoVNb	0.52~0.60	0.40~0.70	1.00~1.30	≤0.35	V 0.08~0.15 Mo 0.30~0.40 Nb 0.01~0.03	0.35	0.25	0.040	0.040

表 3.1.4-15　　**热轧弹簧钢机械性能**

钢号	热处理制度 淬火温度(℃)	淬火剂	回火温度(℃)	机械性能 屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	伸长率 δ_{10} (%)	断面吸收率 ψ (%)	交货状态	硬度 HB ≤	用途
65	840	油	500	785	981		9	35	热轧	285	可淬透12~15 mm的直径，用于制造板弹簧、螺旋弹簧、卡箍、弹性夹头、簧片等
70	830	油	480	834	1030		8	30		285	
75	820	油	480	883	1079		7	30		302	
85	820	油	480	981	1128		6	30		302	
65 Mn	830	油	540	785	981		8	30	热轧	302	可淬透20 mm直径，适用于做较大尺寸的扁圆弹簧、座垫板簧、弹簧发条、弹簧环、气门簧、冷卷簧等

钢号	热处理制度			机械性能					交货状态	硬度 HB ≤	用途
	淬火温度 (℃)	淬火剂	回火温度 (℃)	屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b	伸长率 δ_5	伸长率 δ_{10}	断面吸收率 ψ			
				(MPa)		(%)		(%)			
55Si2Mn	870	油	480	1177	1275		6	30	热轧	302	主要用于制造板簧、螺旋弹簧(截面可达 25 mm)，安全阀和止回阀用弹簧，以及其它高应力下工作的重要弹簧，还可作耐热(<250℃)弹簧等
55Si2MnB	870	油	480	1177	1275		6	30		321	
60Si2Mn	870	油	480	1177	1275		5	25		321	
60Si2MnA	870	油	440	1373	1569		5	20		321	
70Si3MnA	860	油	430	1569	1765		5	20	热处理	302	
60Si2CrA	870	油	420	1569	1765	6		20	热处理	302	高温性能较稳定，用作高应力的弹簧，制造受高负荷，耐冲击或耐热(≤350℃)弹簧
65Si2MnWA	850	油	420	1667	1863	5		20		302	
60Si2CrVA	850	油	410	1667	1863	6		20		302	
50CrMn	840	油	490	1079	1275		5	35	热轧	321	制造大截面和较重要的板簧、螺旋弹簧
55SiMnVB	860	油	460	1226	1373		5	30	—	—	
50CrVA	850	油	500	1128	1275	10		40	热轧	321	高温性能稳定、淬透性高，适于制造大截面 50 mm的高应力或耐热(<350℃)螺旋弹簧，如喷油器弹簧
30W4Cr2VA	1050/1100	油	600	1324	1471	7		40	热处理	321	高强度耐热弹簧钢，淬透性特别高制造高温(<500℃)条件下使用的弹簧
55SiMnMoV	880	油	550	1275	1373		6	30	热轧	321	用于大截面板弹簧
55SiMnMoVNb	880	油	530	1275	1373		8	35		321	

8 轴承钢

滚动轴承钢主要用以制造各种滚动轴承套圈和滚动体，有时也用于制造耐磨零件。在特殊条件下工作的轴承还应满足耐蚀、耐高温、耐低温、防磁等要求，因此也选用其他钢类如结构钢、不锈钢、耐热钢等制造轴承。

一般轴承用钢主要是铬轴承钢。铬除了增加淬透性外，在钢中部分地溶于铁素体，部分与碳组成渗碳体型的碳化物 $(Fe,Cr)_3C$，含铬的合金渗碳体在淬火加热时溶解较慢，可减少过热倾向。铬可以改善热处理性能，提高淬透性、组织均匀性、回火稳定性。近年来，发展多元素的铬轴承钢，提高硅、锰含量可以提高淬透性，适当增加残余奥氏体数量和其稳定性。

在铬轴承钢中具有代表性的是 GCr15，用于制造一般要求的各种滚动轴承，也常用来制造燃油泵的柱塞和套筒、出油阀和阀座、喷油嘴体和针阀、冷冲模、量具和丝锥等。

轴承钢钢号（YB 9—68）和化学成分见表 3.1.4-16。

表 3.1.4-16　　　　　　　　　　**铬轴承钢的化学成分**

钢号	化学成分（%）								硬度
	C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu	HB
					≤				（退火状态）
GCr6	1.05～1.15	0.20～0.40	0.15～0.35	0.40～0.70	0.020	0.027	0.30	0.25	170～207
GCr9	1.00～1.10	0.20～0.40	0.15～0.35	0.90～1.20					170～207
GCr9SiMn	1.00～1.10	0.90～1.20	0.40～0.70	0.90～1.20					179～217
GCr15	0.95～1.05	0.20～0.40	0.15～0.35	1.30～1.65					170～207
GCr15SiMn	0.95～1.05	0.90～1.20	0.40～0.65	1.30～1.65					

9　不锈耐酸钢

不锈耐酸钢是指一些在空气、水、盐的水溶液、酸及其他腐蚀介质中具有高度化学稳定性的钢类。其分类是按高温(900～1100℃)加热并在空气中冷却后钢的基体组织类型进行的。通常分为马氏体不锈钢(如 Cr13型的2Cr13、9Cr18等)、铁素体不锈钢(如1Cr28、1Cr17等)奥氏体不锈钢（如 18-8 型的1Cr18Ni9）及奥氏体-铁素体复相不锈钢（如1Cr21Ni5等)。

轮机工程中最常用的是 Cr13型马氏体不锈钢（又称铬不锈钢）和 18-8 型奥氏体（又称铬镍不锈钢)。前者中的0Cr13～2Cr13主要用于制造船舶柴油机安全阀，起动阀阀杆、阀座，汽轮机叶片、各种在蒸汽或水中使用的活塞、螺栓和螺母等。3Cr13和4Cr13主要用于制造高温高应力下工作的汽轮机调整机构的弹簧和滚珠轴承等。后者 18-8 型主要用来制造热交换器、安全阀阀座、排气阀、排气系统喷管、螺旋桨、扣合修复用的波浪键和操纵仪器中的无磁或低磁性零部件。

不锈耐酸钢标准（GB1220—75）适用于热轧和锻制的不锈耐酸钢条钢，其化学成分同样适用于锭、坯及其制品，其化学成分见表 3.1.4-17，机械性能见表 3.1.4-18。

表 3.1.4-17　　　　　　　　　　**不锈耐酸钢化学成分**

钢号	化学成分（%）									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo	其它
0Cr13	≤0.08	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12.00～14.00				
1Cr14S	≤0.15	≤0.60	≤0.80	0.20～0.40	≤0.035	13.00～15.00				
1Cr17	≤0.12	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16.00～18.00				
1Cr28	≤0.15	≤1.00	≤0.80	≤0.030	≤0.035	27.00～30.00		≤0.20		
0Cr17Ti	≤0.08	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16.00～18.00		5×C%～0.80		
1Cr17Ti	≤0.12	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16.00～18.00		5×C%～0.80		
1Cr25Ti	≤0.12	≤1.00	≤0.80	≤0.030	≤0.035	24.00～27.00		5×C%～0.80		
1Cr17Mo2Ti	≤0.10	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16.00～18.00		≥7×C%	1.60～1.90	

续上表

钢号	化学成分(%)									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo	其它
1Cr13	0.08~0.15	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12.00~14.00				
2Cr13	0.16~0.24	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12.00~14.00				
3Cr13	0.25~0.34	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12.00~14.00				
4Cr13	0.35~0.45	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12.00~14.00				
3Cr13Mo	0.28~0.35	≤0.60	≤0.80	≤0.030	≤0.035	12.00~14.00			0.50~1.00	
1Cr17Ni2	0.11~0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	16.00~18.00	1.50~2.50			
2Cr13Ni2	0.20~0.30	≤0.50	0.80~1.20	0.15~0.25	0.08~0.15	12.00~14.00	1.50~2.50			
9Cr18	0.90~1.00	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00				
9Cr18MoV	0.85~0.95	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00			1.00~1.30	V 0.07~0.12
00Cr18Ni10	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~12.00			
0Cr18Ni9	≤0.06	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00			
1Cr18Ni9	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00			
2Cr18Ni9	0.13~0.22	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00			
0Cr18Ni9Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00	5×C%~0.70		
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00	5(C%—0.02)~0.80		
1Cr18Ni11Nb	≤0.10	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~20.00	9.00~13.00			Nb 8×C%~1.50
2Cr13Mn9Ni4	0.15~0.25	≤1.00	8.00~10.00	≤0.030	≤0.060	12.00~14.00	3.70~5.00			
1Cr14Mn14Ni	≤0.12	≤1.00	13.00~15.00	≤0.030	≤0.060	13.00~15.00	1.00~2.00			
1Cr18Mn8Ni5N	≤0.10	≤1.00	7.50~10.00	≤0.030	≤0.060	17.00~19.00	4.00~6.00			N 0.15~0.25
2Cr15Mn15Ni2N	0.15~0.25	≤1.00	14.00~16.00	≤0.030	≤0.060	14.00~16.00	1.50~3.00			N 0.15~0.30
00Cr17Ni14Mo2	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16.00~18.00	12.00~16.00		1.80~2.50	

钢号	化学成分 (%)									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo	其它
0Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16.00~19.00	11.00~14.00	5×C%~0.70	1.80~2.50	
1Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16.00~19.00	11.00~14.00	5(C%—0.02)~0.80	1.80~2.50	
00Cr17Ni14Mo3	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16.00~18.00	12.00~16.00		2.50~3.50	
0Cr18Ni12Mo3Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16.00~19.00	11.00~14.00	5×C%~0.70	2.50~3.50	
1Cr18Ni12Mo3Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	16.00~19.00	11.00~14.00	5(C%—0.02)~0.80	2.50~3.50	
00Cr18Ni14Mo2CuZ	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	12.00~16.00		1.20~2.50	Cu 1.00~2.50
0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	17.00~19.00	≥7×C%	1.80~2.20	Cu 1.80~2.20
0Cr23Ni28Mo3Cu3Ti	≤0.06	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	22.00~25.00	26.00~29.00	0.40~0.70	2.50~3.00	Cu 2.50~3.50
0Cr21Ni5Ti	≤0.08	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	20.00~22.00	4.80~5.80	5×C%~0.70		加入B.Xt
1Cr21Ni5Ti	0.09~0.14	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.035	20.00~22.00	4.80~5.80	5(C%—0.02)~0.80		加入B、Xt
1Cr18Mn10Ni5Mo3N	≤0.10	≤1.00	8.50~12.00	≤0.030	≤0.060	17.00~19.00	4.00~6.00		2.80~3.50	N 0.20~0.30 加入B、Xt
0Cr17Mn13Mo2N	≤0.08	≤1.00	12.00~15.00	≤0.030	≤0.060	16.50~18.00			1.80~2.20	N 0.20~0.30 加入Xt、B
1Cr18Ni11Si4AlTi	0.10~0.18	3.40~4.0	≤0.80	≤0.030	≤0.035	17.50~19.50	10.00~12.00	0.40~0.70		Al 0.10~0.30 加入B、Xt
0Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.035	15.50~17.50	3.00~5.00			Nb 0.15~0.45 Cu 3.00~5.00
0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.035	16.00~18.00	6.50~7.50			Al 0.75~1.50
0Cr15Ni7Mo2Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.035	14.00~16.00	6.50~7.50		2.00~3.00	Al 0.75~1.50

表 3.1.4-18　　　　　　　　　　　　　　不锈耐酸钢机械性能

钢　号	热处理制度		机械性能 ≥						退火或高温回火态硬度HB ≤	用　　途
	淬火温度(℃)及冷却剂	回火温度(℃)及冷却剂	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击值 a_k (J/cm²)	硬度 HRC		
0Cr13	1000～1050 油、水	700～790 油、水、空	490	343	24	60				制作较高韧性及受冲击负荷的零件，如汽轮机叶片、结构架、不锈设备、衬里、螺栓、螺帽、阀件、蒸汽或水中用活塞
1Cr14S	1010～1050 油	680～780 油、水	539	294	16	55				抗大气腐蚀性能良好的易切削钢，可作自动机床加工光滑表面零件用
1Cr17		750～800 空	392	245	20	50				硝酸盛酸桶输送管道等
1Cr28		700～800 空	441	294	20	45				发烟硝酸或磷酸的容器，及作次氯酸钠及磷酸设备
0Cr17Ti		700～800 空	441	294	20					同1Cr17
1Cr17Ti		700～800 空	441	294	20					同1Cr17
1Cr25Ti		700～800 空	441	294	20	45				同1Cr28
1Cr13	1000～1050 油、水	700～790 油、水、空	588	412	20	60	90		187	同0Cr13
2Cr13	1000～1050 油、水	660～770 油、水、空	647	441	16	55	80		197	同0Cr13
3Cr13	1000～1050 油、水	200～300						48	207	作较高硬度及高耐磨性的热油泵轴、阀片、阀门、轴承、弹簧等零件
4Cr13	1050～1100 油	200～300						50	229	同3Cr13
3Cr13Mo	1025～1075 油	200～300						50	207	同3Cr13
1Cr17Ni2	950～1050 油	275～350 空	1079		10		50		285	具有较高程度的耐硝酸及有机酸腐蚀的零件、容器和设备
2Cr13Ni2	供应状态		687～981						285	同1Cr14S
9Cr18	1000～1050 油	200～300 油、空						55	255	不锈切片机械刃具及剪切刀具、高耐磨设备零件等

续上表

钢号	热处理制度		机械性能 ≥						退火或高温回火态硬度HB ≤	用途
	淬火温度(℃)及冷却剂	回火温度(℃)及冷却剂	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击值 a_k (J/cm²)	硬度 HRC		
9Cr18MoV	1050～1075 油	100～200 空						55	262	同9Cr18
00Cr18Ni10	1050～1100 水		481	177	40	60				具有良好耐蚀及耐晶间腐蚀性能的微碳不锈耐酸钢
0Cr18Ni9	1080～1130 水		490	196	45	60				焊接镍铬钢用的焊芯
1Cr18Ni9	1100～1150 水		539	196	45	50				不锈耐酸的外壳、浮筒、安全阀、热交换器以及船舶控制设备的低磁零件
2Cr18Ni9	1100～1150 水		569	216	40	55				同1Cr18Ni9
0Cr18Ni9Ti	950～1050 水		490	216	40	55				作焊芯、抗磁仪表、耐酸容器及设备衬里，输送管道等设备和零件，有较好耐晶间腐蚀性
1Cr18Ni9Ti	1000～1100 水		539	216	40	55				同0Cr18Ni9Ti
1Cr18Ni11Nb	1000～1100 水		539	216	40	55				同0Cr18Ni9
2Cr13Mn9Ni4	1000～1150 水		637	245	35	55				作有一定耐蚀要求的冲压件及结构件材料，代1Cr18Ni9
1Cr14Mn14Ni	1000～1150 水		637	245	40					同2Cr13Mn9Ni4
1Cr18Mn8Ni5N	1100～1150 水		637	294	45	60				同2Cr13Mn9Ni4
2Cr15Mn15Ni2N	1000～1150 水		637	294	40	45				制作低磁性能的零件具有良好的低磁稳定性。
00Cr17Ni14Mo2	1050～1100 水		481	177	40	60				同00Cr18Ni10
0Cr18Ni12Mo2Ti	1000～1100 水		539	216	40	55				用于抵抗硫酸、磷酸、蚁酸、醋酸的设备，有良好耐晶间腐蚀性
1Cr18Ni12Mo2Ti	1000～1100 水		539	216	40	55				同0Cr18Ni12Mo2Ti
00Cr17Ni14Mo3	1050～1100 水		481	177	40	60				同00Cr18Ni10

钢 号	热处理制度		机 械 性 能 ≥						退火或高温回火态硬度HB ≤	用 途
	淬火温度 (℃)及冷却剂	回火温度 (℃)及冷却剂	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ϕ (%)	冲击值 a_k (J/cm²)	硬度 HRC		
0Cr18Ni12Mo3Ti	1000～1100 水		539	216	40	55				同0Cr18Ni12Mo2Ti
1Cr18Ni12Mo3Ti	1000～1100 水		539	216	40	55				同0Cr18Ni12Mo2Ti
00Cr18Ni14Mo2Cu2	1050～1100 水		481	177	40	60				同00Cr18Ni10
0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	1050～1100 水		637	226	40					抗硫酸、磷酸、盐酸腐蚀的设备并具有良好耐晶间腐蚀性
0Cr23Ni28Mo3Cu3Ti	1100～1150 水、空		539	196	45	60				抗浓、稀硫酸及稀盐酸等强腐蚀解质的设备
1Cr21Ni5Ti	950～1050 水、空		588	343	20	40				同0Cr21Ni5Ti
1Cr18Mn10Ni5Mo3N	1100～1150 水		687	343	45	65				对尿素有良好的耐蚀性，可制造尿素腐蚀的设备
0Cr17Mn13Mo2N	1030～1070 水		736	441	30	55				同1Cr18Mn10Ni5Mo3N
1Cr18Ni11Si4AlTi	930～1050 水		716	441	25	40	80			制作抗高温浓硝酸介质的零件和设备
0Cr17Ni4Cu4Nb	Ⅰ：1040℃（水、空）							HB≤ 363		用于有一定耐蚀要求的高强度容器、零件及结构件
	Ⅱ：1040℃（水、空）+480℃回火4小时（空）		1314	1177	10	40		40		
	Ⅲ：1040℃(水、空)+495℃回火4h(空)		1177	1069	10	44		38		
	Ⅳ：1040℃(水、空)+550℃回火4h(空)		1069	1000	12	45		35		
	Ⅴ：1040℃(水、空)+580℃回火4h(空)		1000	863	13	45		31		
	Ⅵ：1040℃(水、空)+620℃回火4h(空)		932	726	16	50		28		

续上表

钢号	热处理制度		机械性能≥						退火或高温回火态硬度HB≤	用途
	淬火温度(℃)及冷却剂	回火温度(℃)及冷却剂	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击值 a_k (J/cm²)	硬度 HRC		
0Cr17Ni7Al	I：1050℃（水、空） II：1050℃（水、空）+760℃ 90 min(空)+565℃回火 90 min(空)		1138	961	5	25		HB≤229 HB≥363		同0Cr17Ni4Cu4Nb
	III：1050℃(水、空)+950℃ 10分(空)+−73℃冰处理 8 h+510℃回火 30～60 min(空)		1226	1030	4	10		HB≥388		
0Cr15Ni17Mo2Al	I：1050℃（水、空） II：1050℃（水、空）+760℃ 90 min(空)+565℃回火 90 min(空)		1206	1098	7	25		HB≤269 HB≥375		同0Cr17Ni4Cu4Nb
	III：1050℃(水、空)+950℃ 10 min(空)+−73℃冰处理 8 h+510℃回火 30～60 min(空)		1324	1206	6	20		HB≥388		

10 耐热钢

耐热钢具有高温化学稳定性、高温强度和高的蠕变极限。耐热钢按显微组织可大致分为四类：珠光体型耐热钢，其合金元素总含量一般不超过5％，工作温度范围为350～620℃，常用做锅炉、汽轮机耐热零件；马氏体型耐热钢，是在1Cr13基础上发展起来的，经淬火、高温回火后使用，主要用做汽轮机叶片和阀门钢等；铁素体型耐热钢，属于抗氧化钢，用做热交换器、吊架等；奥氏体型耐热钢，用在600～810℃范围内，可做燃气涡轮、锅炉耐热构件等。

在更高温度下工作的零件，常使用镍基合金。

在轮机工程中最常用的是马氏体型中的铬硅钢，如1Cr6Si2Mo、4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo，它们用以制造内燃机的安全阀、启动阀、排气阀和组合活塞头部等零件。另外是奥氏体型的1Cr18Ni9Ti及4Cr14Ni14W2Mo钢，用以制造汽轮机叶片、重负荷内燃机排气阀和过热器与燃气管道零件。属于马氏体-奥氏体型的3Cr13Ni7Si2钢，则是用以制造抗氧化为850℃、热强温度为700℃的内燃机重负荷进气阀和轻负荷排气阀的材料。

耐热钢标准（GB1221-75）适用于热轧和锻制的耐热钢条钢，也适用于锭、坯及其制品，其化学成分见表3.1.4-19，机械性能见表3.1.4-20，主要性能及用途见表3.1.4-21。

表 3.1.4-19　　耐热钢化学成分

钢号	化学成分(%)									
	C	Mn	Si	Ni	Cr	W	V	Mo	Ti	其它
1Cr13Si3	≤0.12	≤0.70	2.30~2.80	≤0.60	12.50~14.50					
1Cr18Si2	≤0.12	≤1.00	1.90~2.40	≤0.60	17.00~19.00					
1Cr25Si2	≤0.10	≤1.00	1.60~2.10	≤0.60	24.00~26.00					
1Cr13SiAl	0.10~0.20	≤0.70	1.00~1.50	≤0.60	12.00~14.00					Al: 1.00~1.80
1Al3Mn2MoWTi	0.12~0.18	1.50~2.00	≤0.50	≤0.60		0.40~0.60		0.40~0.60	0.20~0.40	Al: 2.20~2.80
1Cr13	0.08~0.15	≤0.80	≤0.60	≤0.60	12.00~14.00					
2Cr13	0.16~0.24	≤0.80	≤0.60	≤0.60	12.00~14.00					
1Cr5Mo	≤0.15	≤0.60	≤0.50	≤0.60	4.00~6.00			0.45~0.60		
1Cr6Si2Mo	≤0.15	≤0.70	1.50~2.00	≤0.60	5.00~6.50			0.45~0.60		
1Cr11MoV	0.11~0.18	≤0.60	≤0.50	≤0.60	10.00~11.50		0.25~0.40	0.50~0.70		
1Cr12WMoV	0.12~0.18	0.50~0.90	≤0.50	0.40~0.80	11.00~13.00	0.70~1.10	0.15~0.30	0.50~0.70		
4Cr9Si2	0.35~0.50	≤0.70	2.00~3.00	≤0.60	8.00~10.00					
4Cr10Si2Mo	0.35~0.45	≤0.70	1.90~2.60	≤0.60	9.00~10.50			0.70~0.90		
3Cr13Ni7Si2	0.25~0.37	≤0.70	2.00~3.00	6.00~7.50	11.50~14.00					
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤2.00	≤1.00	8.00~11.00	17.00~19.00				5(C−0.02)~0.80	
1Cr18Ni12Ti	≤0.12	1.00~2.00	≤1.00	11.00~13.00	17.00~19.00				5(C−0.02)~0.80	
1Cr23Ni13	≤0.20	≤2.00	≤1.00	12.00~15.00	22.00~25.00					
1Cr23Ni18	≤0.20	≤2.00	≤1.00	17.00~20.00	22.00~25.00					
1Cr20Ni14Si2	≤0.20	≤1.50	1.50~2.50	12.00~15.00	19.00~22.00					
1Cr25Ni20Si2	≤0.20	≤1.50	1.50~2.50	18.00~21.00	24.00~27.00					

续上表

钢号	化学成分(%)									
	C	Mn	Si	Ni	Cr	W	V	Mo	Ti	其它
3Cr18Ni25Si2	0.30~0.40	≤1.50	1.50~2.50	23.00~26.00	17.00~20.00					
4Cr14Ni14W2Mo	0.40~0.50	≤0.70	≤0.80	13.00~15.00	13.00~15.00	2.00~2.75		0.25~0.40		
1Cr15Ni36W3Ti	≤0.12	1.00~2.00	≤0.80	34.00~38.00	14.00~16.00	2.80~3.20			1.00~1.40	
3Cr18Mn12Si2N	0.22~0.30	10.50~12.50	1.40~2.20		17.00~19.00					N: 0.22~0.80
2Cr20Mn9Ni2Si2N	0.17~0.26	8.50~11.00	1.80~2.70	2.00~3.00	18.00~21.00					N: 0.20~0.30
0Cr15Ni25Ti2MoVB	≤0.08	1.00~2.00	0.40~1.00	24.00~27.00	13.50~16.00		0.10~0.50	1.00~1.50	1.75~2.30	Al ≤ 0.40 B 0.001~0.010
4Cr12Ni18Mn8MoVNb	0.34~0.40	7.50~9.50	0.30~0.80	7.00~9.00	11.50~13.50		1.25~1.55	1.10~1.40	≤0.12	Nb 0.25~0.50

注：3Cr18Mn12Si2N，P≤0.060%；2Cr20Mn9Ni2Si2N，P≤0.060%；其余均含 S≤0.030%，P≤0.035%。

表 3.1.4-20 **耐热钢机械性能**

钢号	热处理制度			机械性能 ≥				
	淬火	回火	退火	抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ	断面收缩率 φ	冲击值 a_k
	温度(℃) 冷却剂	温度(℃) 冷却剂	温度(℃) 冷却剂	(MPa)		(%)		(J/cm²)
1Cr13Si3			700~800 空	588	392	15		
1Cr18Si2			700~800 空	539	343	15	35	
1Cr25Si2			700~800 空	490	343	15		
1Cr13SiAl			700~800 空	490	275	16		
1Al3Mn2MoWTi			740~760 空	490	314	18	35	
1Cr13	1000~1050 油、水	700~790 油、水、空		588	412	20	60	90
2Cr13	1000~1050 油、水	660~770 油、水、空		647	441	16	55	80
1Cr5Mo	900~950 油	600~700 空		588	392	18		
1Cr6Si2Mo				539	294	30	60	
1Cr11MoV	1050~1100 空	720~740 空		686	490	16	55	60
1Cr12WMoV	1000~1050 油	680~700 空		735	588	15	45	60
4Cr9Si2	1020~1040 油	700~780 油		883	588	19	50	
4Cr10Si2Mo	1010~1040 油	720~760 空		883	686	10	35	

续上表

钢　号	热　处　理　制　度			机　械　性　能　≥				
	淬　火	回　火	退　火	抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ	断　面 收缩率 φ	冲击值 a_k
	温度(℃) 冷却剂	温度(℃) 冷却剂	温度(℃) 冷却剂	(MPa)		(%)		(J/cm²)
3Cr13Ni7Si2	1040～1060℃水冷，860～880℃ 6 h，在 2 h内冷至700℃，再随炉冷至660～680℃ 30 min空冷，升温至790～810℃油冷			1177	785	10	25	20
1Cr18Ni9Ti	1000～1100 水			539	196	40	55	
1Cr18Ni12Ti	1100～1150 水			539	196	40	55	
1Cr23Ni13	1100～1150 油、水、空			539	245	35	50	
1Cr23Ni18	1100～1150 油、水、空			539	245	35	50	
1Cr20Ni14Si2	1100～1150 油、水、空			588	294	35	50	
1Cr25Ni20Si2	1100～1150 油、水、空			588	294	35	50	
3Cr18Ni25Si2	1100～1150 油、水、空			637	343	25	40	
4Cr14Ni14W2Mo			820～850　空	706	314	20	35	50
1Cr15Ni36W3Ti	1140～1160℃水冷，两次时效：1）780～790℃，2）730～740℃			735	392	15	35	60
3Cr18Mn12Si2N	1100～1150 油、水、空			686	392	35	45	
2Cr20Mn9Ni2Si2N	1100～1150 油、水、空			637	392	35	45	
0Cr15Ni25Ti2MoVB	980～1000℃ 1～2 h油冷，700～720℃ 12-16 h空冷			932		20	40	
4Cr12Ni8Mn8MoVNb	1100～1150℃水冷，670℃ 12～14 h时效，升温至770～800℃ 10～12 h，空冷			834	588	15	20	35

表 3.1.4-21　**耐热钢主要性能及用途举例**

钢　号	主　要　性　能	最高使用温度(℃)		用　途　举　例
		抗氧化	热　强	
1Cr13Si3	铁素体钢，有晶粒长大倾向，不宜承受冲击负荷，但抗氧化性好，在含硫气氛中有好的抗蚀性适宜制作各种承受应力不大的炉用构件。	900		过热器吊架，吹灰器管，喷嘴、退火炉罩，托架及吊挂等
1Cr13SiAl		900		
1Cr18Si2		1050		热交换器，渗碳箱
1Cr25Si2		1150		

钢　　号	主 要 性 能	最高使用温度(℃)		用 途 举 例
		抗氧化	热　强	
1Cr23Ni13 1Cr20Ni14Si2 3Cr18Ni25Si2 1Cr23Ni18 1Cr25Ni20Si2	奥氏体钢，有较高的高温强度及抗氧化性，对含硫气氛较敏感，在600～800℃有析出相的脆化倾向适宜制作承受应力的各种炉用构件	1050 1050 1100 1100 1200		热裂解管，炉内传送带，炉内支架 各种热处理炉内构件，锅炉吊架 高温热裂解炉管、板材、高温测温管，退火炉罩 高温加热炉管，加热炉辊筒，燃烧室构件
3Cr18Mn12Si2N 2Cr20Mn9Ni2Si2N	节镍奥氏体钢，有较高的高温强度和一定的抗氧化性，并且有较好的抗硫及抗增碳性	1000		吊挂支架，渗碳炉构件，加热炉构件，加热炉传送带，料盘，炉爪
1Al3Mn2MoWTi	无铬抗碳耐蚀钢，有良好的抗硫及抗氧化性。	650		石油炼厂加热炉管及反应塔体和塔内构件
1Cr13 2Cr13	有较高的强度和良好的减振性能	750 750	500 500	蒸汽透平叶片、阀、螺栓和导管等
1Cr11MoV 1Cr12WMoV	有较高的热强性，良好的减振性及组织稳定性	750 750	550 580	透平叶片及导向叶片 透平叶片、紧固件、转子及轮盘
1Cr5Mo 1Cr6Si2Mo	抗石油裂化过程中产生的腐蚀	650 750	600 600	过热蒸汽管，锅炉吊架，汽轮机气缸衬套泵的零件、阀、活塞杆，高压加氢设备部件、紧固件
1Cr18Ni9Ti 1Cr18Ni12Ti	有良好的耐热性及抗腐蚀性	850 850	650 650	加热炉管，燃烧室筒体，退火炉罩 过热器管
4Cr12Ni8Mn8MoVNb	有较高的热强及良好的综合性能	750	650	涡轮盘，环形件、紧固件和废气增压涡轮
1Cr15Ni36W3Ti	有较高的热强性及综合性能	800	680	燃汽轮机叶片、紧固件、叶轮、转子和汽封弹簧片
0Cr15Ni25Ti2MoVB	有良好的热弹性、成型性及焊接性	800	700	涡轮盘，环形件，冲压焊接件和紧固件
4Cr9Si2 4Cr10Si2Mo	马氏体汽阀钢	850 850	650 650	内燃机进气阀，轻负荷发动机的排气阀
3Cr13Ni7Si2	马氏体—奥氏体汽阀钢，有较好的抗氧化性	850	700	内燃机轻负荷排气阀，重负荷进气阀
4Cr14Ni14W2Mo	奥氏体型汽阀钢，有较高的热强性	850	750	内燃机重负荷排气阀

11　船用碳素钢铸件

船用碳素钢铸件应符合碳素钢铸件分类及技术条件(GB979—67)，按其含碳量分为以下5种牌号：ZG200-400、ZG230-450、ZG270-500、ZG310-570、ZG340-640。铸件按化学成分和机械性能分为3级：I级—高级铸件、II级—优质铸件、III级—普通铸件，级别符号应附在牌号后面，III级不注级别。

碳素钢铸件化学成分见表3.1.4-22，经热处理后的机械性能应符合表3.1.4-23的规定。

船用碳素钢铸件分级应用参照船用碳素钢铸钢技术条件（CB772—70），见表3.1.4-24。

表 3.1.4-22 **碳素钢铸件化学成分**

铸件牌号	化学成分 (%)		
	C	Mn	Si
ZG 200-400	0.12～0.22	0.35～0.65	0.20～0.45
ZG230-450	>0.22～0.32	0.50～0.80	0.20～0.45
ZG270-500	>0.32～0.42	0.50～0.80	0.20～0.45
ZG310-570	>0.42～0.52	0.50～0.80	0.20～0.45
ZG340-640	>0.52～0.62	0.50～0.80	0.20～0.45

注：硫磷含量对于 I 级铸件均不大于 0.04%，II 级铸件不大于 0.05%，III 级铸件不大于 0.06%。当酸性转炉生产 III 级铸件时，允许硫磷含量分别提高到硫小于 0.07%；磷小于 0.09%。

表 3.1.4-23 **铸件热处理后的机械性能**

铸件牌号	机械性能 不小于				
	屈服极限 σ_s	强度极限 σ_b	延伸率 δ_5	断面收缩率 ψ	冲击值 a_k
	(MPa)		(%)		(J/cm²)
ZG200-400	196	392	25	40	60
ZG230-450	235	441	20	32	45
ZG270-500	275	490	16	25	35
ZG310-570	314	569	12	20	30
ZG340-640	343	637	10	18	20

注：①各级铸件，均要检验下列机械性能：I 级测定 σ_s、σ_b、δ_5 及ψ，并做冲击韧性试验；II 级测定 σ_s、σ_b、δ_5；III 级测定 σ_b、δ_5。每次检验采用一个抗拉试样和两个冲击试样。

②检验时，如果有一个试验不符合规定，则取加倍的试样，检验该不合格的项目。

③机械性能试验用试样毛坯应在浇注时单独铸出，毛坯形状由制造厂决定，但主要尺寸和试样切取位置应符合图 3.1.4-1的要求。如用户有特殊要求时，允许在铸件上铸出，其部位由双方协商后确定。

表 3.1.4-24 **铸件分级表**

级别	使用特性	举例	验收项目
I	工作时承受冲击，震动负荷的零件	首柱、尾柱、人字架、螺旋桨、螺旋桨叶片、舵杆、舵扇、锚、锚杆、曲轴曲柄、摇臂、活塞头、汽缸盖、链轮、主轴承、推力轴承、连杆上下轴承、海底阀、尾轴管、过热蒸汽的主要阀壳、泥浆泵的绞刀架、绞刀头等零件	1) 化学成分 2)抗拉强度，屈服点，延伸率，断面收缩率 3) 冲击
II	工作时承受静负荷的零件	主机机座、机架、齿轮、凸轮轴承、十字头、推力轴承外壳、减速器外壳、起重机钢丝滚筒、推进器毂、锚链筒、起重机链轮、舵的填料函和扇形齿轮、发动机汽缸、辅机齿轮、各种起重滑轮、吊货杆的支架、带缆桩、舷旁阀、螺旋制链器和闸力制链器的底座、夹板、压缩空气的附件、液压系统的附件、泥浆泵之叶轮、阀壳、机动装置中之齿轮等零件	1) 化学成分 2)抗拉强度，屈服点。延伸率，断面收缩率
III	工作时受力不大的零件	手轮、手柄、舷边缆孔、各种导缆钳、导缆钳滚轮、舱底系统、压载系统、循环系统、排水系统的附件、系船羊角、舷窗框架、铰链、地轴填料函、十字头拖板、手动装置的齿轮、锚链孔、舵轮架、受力不大的机座、受力不大的锅炉框板、重型推力轴承的马蹄板、支柱座、淡水、滑油、燃料系统的阀件、各种低压阀、手扶架等零件	化学成分 (在化学成分不合格时可试验抗拉强度和延伸率。)

注：①首柱、尾柱、人字架、螺旋桨除上述项目外，应补充冷弯、跌落。

②螺旋桨叶片、曲柄、舵杆、舵扇除上述项目外，应补充试验冷弯。

③锚、锚杆除上述项目外，应补充试验跌落。

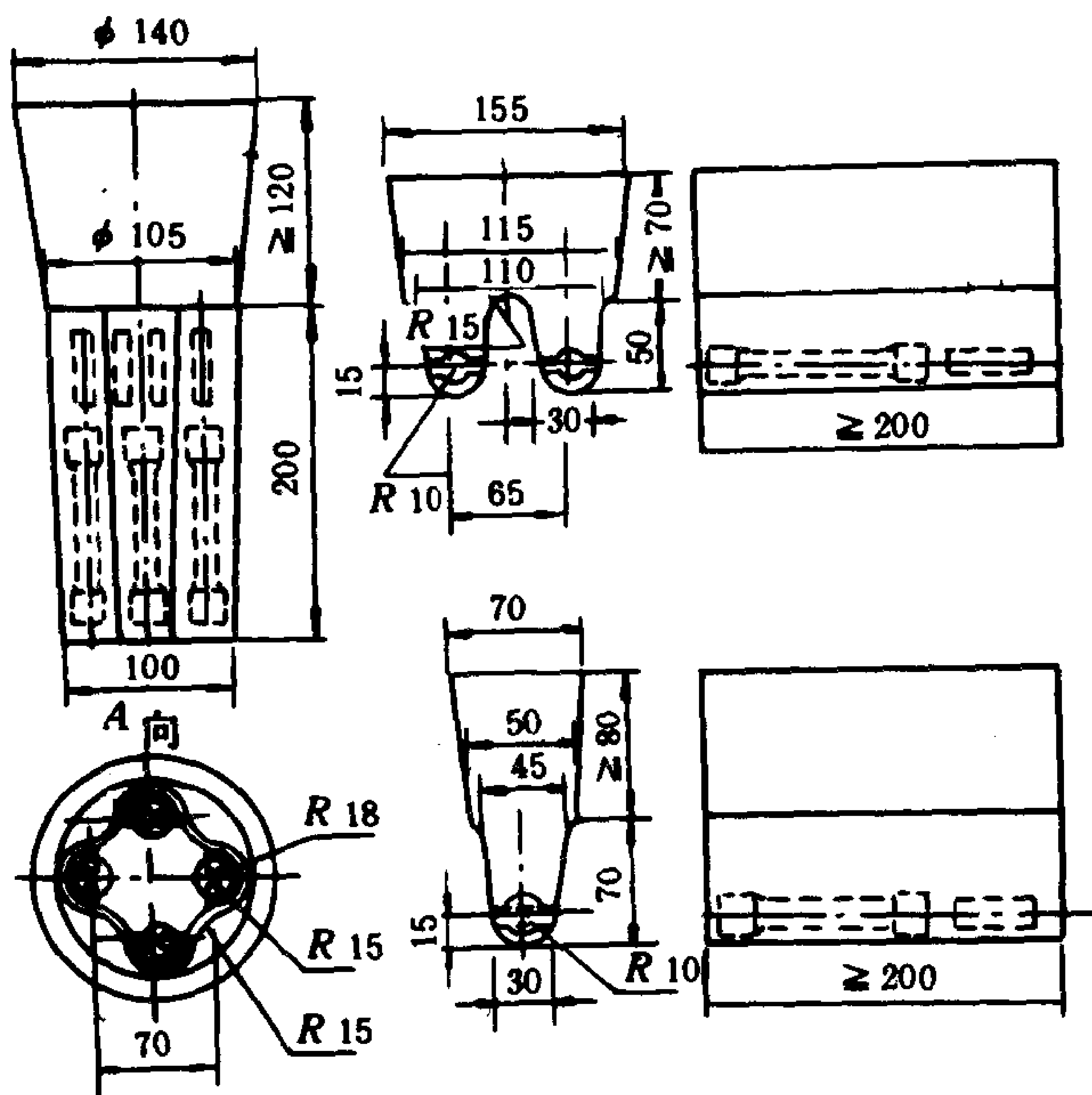


图 3.1.4-1 铸件性能试验试样

12 船用钢锻件技术条件

船用结构钢和船用柴油机锻件技术条件可参照CB 773—70 和CB 778—71 标准。

1)技术要求

(1)锻造用钢应具有化学成分合格证书，钢坯应具有化学成分和机械性能的合格证书。

(2)锻件应有适当的锻造比　碳素钢和合金结构钢锻件：当用钢锭锻造成锻件时，如果按主体最大断面计算，锻造时未进行镦粗者，其锻造比不小于 3；锻造时经镦粗者，其锻造比不小于 2.5；如果按法兰或其它凸出部分计算，锻造比不小于 1.3。当用钢坯锻造成锻件时，如果按主体最大断面计算，其锻造比不小于 1.5；如果按法兰或其它凸出部分计算，锻造比不小于 1.3。

(3)重要锻件毛坯加热、始锻和终锻温度、冷却方法应做出技术记录。

(4)锻件表面不应有夹层、折叠、裂纹、锻伤、结疤、夹渣和过烧现象等缺陷。锻件不允许有白点存在，锻件组织均匀。粗加工前，锻件的局部缺陷应予清除，清除深度不得超过单边余量的 1/2，如超过时，需经锻件使用单位同意。

(5)锻件的表面缺陷必须补焊时，需经用户（设计部门）同意，焊补工艺由双方商定，经焊补的锻件须经技术检查部门验收。

(6)凡必须采用气割成形的碳素结构钢锻件，应消除内应力。

(7)凡属锻件试验等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级与含碳量大于或等于 0.35%以上的第Ⅳ级锻件应作锻后正火处理。

(8)对钢坯或重要锻件低倍组织及非金属夹杂物的缺陷检验规定如下：

①在横向酸浸试片上检查低倍组织时，不允许有肉眼可见的裂缝、非金属夹杂物、白点、折叠、缩孔残余及机械加工后不能消除的皮下气泡等缺陷。

②低倍组织缺陷的合格级别应符合表 3.1.4-25 的规定。

表 3.1.4-25 低倍组织缺陷合格标准

缺陷	合格标准	
	优质碳素结构钢	合金结构钢
一般疏松	≤3 级	≤2.5 级
中心疏松	≤3 级	≤2.5 级
点状液析	≤3 级	≤2.5 级
白点	0 级	0 级

③非金属夹杂物缺陷检查标准见表 3.1.4-26。

表 3.1.4-26 非金属夹杂物缺陷检查标准

种类	钢种	氧化物	硫化物	氧化物+硫化物
		级别≤		
钢坯	优质碳素结构钢	3.0	3.0	5.5
	合金结构钢	3.0	3.0	5.5
钢件	优质碳素结构钢	3.0	3.0	5.5
	合金结构钢	2.5	2.5	4.5

(9)锻件由钢锭锻造时，其低倍组织及非金属夹杂物在锻造后的锻件上取样，只取相对于钢锭的冒口一端；锻件由钢坯锻造时，应有保证钢坯的低倍组织及非金属夹杂物缺陷的合格证书，锻造后的锻件不作此项检验。

(10)锻件上不应有白点，如发现白点时，要逐个检查。

(11)锻件试块的留放位置规定如下：

①由一个钢锭锻制一个锻件时，其质量不超过 1000 kg，且长度不超过 3 m时，试块的位置应留在锻件相当于钢锭的冒口端；锻件质量超过 1000 kg或长度超过 3 m时，试块位置应留在锻件相当于钢锭的冒口端与底部端各一个。

②当一个钢锭锻制成数个锻件时，试块位置应留在相当于钢锭的冒口端与底部端的锻件上各一个。

③试块的截面尺寸必须与锻件的有效截面相近似，锻件及其试块须打钢印编号，以免混淆。

(12)锻件需校直后进行热处理，如热处理后产生弯曲可按下列情况处理：碳素结构钢锻件每米长的弯曲度小于 4 mm，允许冷矫正；每米长的弯曲度大于 4 mm和合金钢锻件，采用热矫正，其热矫正后应消除残余应力处理。

(13)锻件的纵向机械性能试验结果，应符合相应材料的国标规定。若需作切向或横向(或径向）机械性能试验，可按表 3.1.4-27 降低值（%）验收。

表 3.1.4-27 切向、横向试样性能允许降低值

试样方向	切向试样					横向或径向试样				
机械性能	抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ	断面收缩率 ψ	冲击值 α_k	抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	伸长率 δ	断面收缩率 ψ	冲击值 α_k
降低值（%）	5	5	25	20	25	10	10	35	35	40

2)船用钢锻件试验分级

锻件根据工作条件，可分为四个检验等级。船用结构钢锻件试验等级列于表 3.1.4-28，船用柴油机钢锻件试验等级列于表 3.1.4-29。锻件按其工作特性，按表确定试验等级，在工艺文件及施工图纸中加以注明。

表 3.1.4-28　　船用结构钢锻件试验等级表

试验等级	锻件工作特性	检查试验项目	检查试验数量	典型锻件举例
I	工作于复杂应力下和受到冲击和振动的零件	1)化学成分 2)拉力试验（确定抗拉、屈服、断面收缩率） 3)冲击韧性试验 4)检查硬度 5)冷弯试验 6)低倍检查（合金钢锻件） 7)高倍与钢的晶粒度（推力轴、尾轴的合金钢锻件）	1)质量<100 kg的锻件，每批(同一炉号，同一锻制工艺，同一炉热处理者）抽查 2%，但不得少于一根试棒 2)质量 100～250 kg的锻件，每批（同一炉号，同一锻制工艺，同一炉热处理者）抽查 10%，但不得少于十根试棒 3)质量 250～1000 kg的锻件（同一锻制工艺，同一炉热处理者）每根坯料锻 5 件以下者留一根试棒，锻 5 件以上者留两根 4)质量>1000 kg或长度>4 m，从每个锻件的一端（相当于钢锭冒口端）留取一根试棒，但应以热处理工艺上保证质量	推力轴、中间轴、尾轴、螺旋桨轴、轴系联轴器、首柱、尾柱、上下舵杆、人字架、连杆、连杆上下头螺栓
II	有固定的重负载和受到较小冲击和振动的零件	1)化学成分 2)拉力试验（确定抗拉、屈服、断面收缩率） 3)冲击韧性试验 4)检查硬度	1)质量<100 kg的锻件，每批(同一炉号，同一锻制工艺，同一炉热处理者）抽查 2%，但不得少于一根试棒 2)质量 100～250 kg的锻件，每批（同一炉号，同一锻制工艺，同一炉热处理者）抽查 10%，但不得少于一根试棒 3)质量 250～1000 kg的锻件（同一锻制工艺，同一炉热处理者）每根坯料锻 5 件以下者留一根试棒，锻 5 件以上者留两根 4)质量大于 1000 kg或长度大于 4 m，从每个锻件的一端（相当于钢锭冒口端）留取一根试棒，但应以热处理工艺上保证质量	活塞杆、十字头、偏心杆、起货吊杆、吊钩、重型拖钩、大型舵柄、舵架零件、主轴承螺栓、轴系法兰螺栓、船用辅机主轴（直径大于 100 mm）
III	有固定的永久负载但不受冲击负载的零件	1)化学成分 2)拉力试验（确定抗拉、屈服）断面收缩率 3)检查硬度	1)质量<100 kg的锻件，每批(同一炉号，同一锻制工艺，同一炉热处理者）抽查 1%，但不得少于一根试棒 2)质量>100 kg的锻件，每批(同一炉号，同一锻制工艺，同一炉热处理者)抽查 10%，但不得少于一根试棒	船用辅机主轴（直径不大于 100 mm），舵柄、舵杆连接螺栓、舵系和轴系用销子、重力负载齿轮、主机传动齿轮，蜗杆、活塞本体、起重叉头、负载紧固件、锅炉孔螺栓
IV	工作负载不大的，受小应力和贮备强度超过计算强度的零件	化学成分		阀体、阀座、阀杆、车叶螺母、船用转环、耳环、叉头、吊艇杆、压制附件的壳体和零件、拖板、轴承外壳、杠杆、小型手柄、手轮、夹扣、天棚围栏装置、船舶舷梯、小型眼环、次要法兰、一般用螺母

表 3.1.4-29　　船用柴油机钢锻件试验分级

试验等级	锻件工作条件	组成批的条件	检查试验项目	检查试验数量	典型锻件举例
I	承受复杂应力，并在冲击和振动条件下工作的零件	同一熔炼炉号，同一炉热处理的锻件	1) 化学成分 2)拉力：σ_b、σ_s、δ_5、ψ 3)冲击韧性 4)硬度 5)低倍（钢锭锻制）	从每批锻件中选取试验用试块数量： 1)质量≤10 kg时： 数量≤30 个取 1 个试块；>30~300 个取 2 个试块；>300 个取 0.5%，但不得少于 2 个试块 2)质量>10~30 kg时： 数量≤26 取 1 个试块；>26~260 个取 2 个试块；>260 个取 1%，但不得少于 3 个试块 3)质量>30~60 kg时： 数量≤22 个取 1 个试块；>22~220 个取 2 个试块；>220 个取 1.5%，但不得少于 4 个试块 4)质量>60~100 kg时： 数量≤18 个取 1 个试块；>18~180 个取 2 个试块，>180 个取 2%，但不得少于 4 个试块 5)质量>100~150 kg时： 数量≤14 个取 1 个试块；>14~140 个取 2 个试块，>140 个取 2.5%，但不得少于 4 个试块 6)质量 150~210 kg时： 数量≤10 个取 1 个试块；>10~100 个取 2 个试块；>100 个取 3%，但不得少于 4 个试块 7)质量>210~1000 kg时： 每根钢坯可锻 6 个以下取 1 个试块，每根钢坯可锻数量超过 6 个取 2 个试块 8)锻件由钢锭制造时，选取试块位置应留在锻件相当于钢锭的冒口端；或留在相当于钢锭的冒口端与底部端的锻件上各一个	曲轴、连杆、连杆螺栓、汽缸盖螺栓、贯穿螺栓、主轴承螺栓、活塞销、进排气阀、弹性轴、增压器轴，叶片
II	承受静应力或交变应力而不受冲击情况下工作的零件	同一熔炼炉号，同一炉热处理的锻件	1)化学成分 2)拉力：σ_b、σ_s、δ_5、ψ 3)硬度 4)低倍（钢锭锻制）		进排气凸轮、进排气摇臂、凸轮轴、连杆螺母、排气阀、座圈
III	承受应力小的，具有很大贮备强度或要求硬度使用的零件	同一钢号，同一热处理规范的锻件	1)化学成分 2)硬度	每批中抽 5%试验硬度，但不得少于 5 个，5 个以下时逐个试验硬度	阀杆、摇臂、启动空气阀门、油泵轴
IV	承受应力不大的，其形状和尺寸根据机械结构要求决定的零件	同一钢号的锻件	化学成分		法兰、垫片、手柄、压板、三通接头

3)各种钢号的锻造温度

普通碳素钢锻造温度范围见表 3.1.4-30；优质碳素结构钢锻造温度范围见表 3.1.4-31；合金结构钢锻造温度范围见表 3.1.4-32；弹簧钢、滚动轴承钢锻造温度范围见表 3.1.4-33；不锈耐酸钢和耐热不起皮钢锻造温度范围见表 3.1.4-34；碳素工具钢，合金工具钢锻造温度范围见表 3.1.4-35；高速工具钢锻造温度范围见表 3.1.4-36。

表 3.1.4-30 **普通碳素钢锻造温度范围**

钢号	锻造温度（℃）		冷却（最大散热尺寸）（mm）		
	始锻	终锻	＜100	100～200	200～300
A 0	1250	750	空冷	空冷	空冷
A 1	1270	750	空冷	空冷	空冷
A 2	1270	750	空冷	空冷	空冷
A 3	1250	750	空冷	空冷	空冷
A 4	1250	750	空冷	空冷	空冷
A 5	1250	750	空冷	空冷	空冷
A 6	1230	780	空冷	空冷	空冷
A 7	1200	800	空冷	空冷	坑冷

表 3.1.4-31 **优质碳素结构钢锻造温度范围**

钢号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始锻	终锻	＜100	100～200	200～300
10	1270	750	空冷	空冷	空冷
15	1270	750	空冷	空冷	空冷
20	1250	750	空冷	空冷	空冷
25	1250	750	空冷	空冷	空冷
30	1250	750	空冷	空冷	空冷
35	1250	750	空冷	空冷	空冷
40	1230	780	空冷	空冷	空冷
45	1230	780	空冷	空冷	空冷
50	1230	800	空冷	空冷	空冷
55	1200	800	空冷	空冷	坑冷
60	1200	800	空冷	空冷	坑冷
65	1180	800	空冷	—	—
70	1180	800	空冷	—	—
75	1150	800	空冷	—	—
80	1120	800	空冷	—	—
85	1120	800	空冷	—	—
15 Mn	1230	780	空冷	空冷	空冷
20 Mn	1230	780	空冷	空冷	空冷
25 Mn	1230	780	空冷	空冷	空冷
30 Mn	1230	780	空冷	空冷	坑冷
35 Mn	1230	780	空冷	空冷	坑冷
40 Mn	1200	780	空冷	空冷	坑冷
45 Mn	1200	780	空冷	空冷	坑冷
50 Mn	1200	780	空冷	空冷	坑冷
60 Mn	1180	800	空冷	—	—
65 Mn	1180	800	空冷	—	—
70 Mn	1180	800	空冷	—	—

表 3.1.4-32 **合金结构钢锻造温度范围**

钢号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始锻	终锻	＜100	100～200	200～300
20 Mn 2	1200	800	空冷	空冷	坑冷
30 Mn 2	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
35 Mn 2	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
40 Mn 2	1180	820	空冷	坑冷	砂冷

续上表

钢　号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始　锻	终　锻	＜100	100～200	200～300
45 Mn 2	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
50 Mn 2	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
27 SiMn	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
35 SiMn	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
42 SiMn	1160	850	空冷	坑冷	砂冷
15 MnV	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
20 MnV	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
25 Mn 2 V	1200	820	空冷	坑冷	砂冷
42 Mn 2 V	1180	850	坑冷	砂冷	砂冷
45 Mn 2 V	1180	850	坑冷	砂冷	砂冷
15 SiMn 3 Mo	1200	850	坑冷	砂冷	炉冷
30 Mn 2 MoW	1150	850	坑冷	砂冷	炉冷
30 SiMn 2 MoV	1180	800	坑冷	砂冷	炉冷
37 SiMn 2 MoV	1170	800	坑冷	砂冷	炉冷
12 SiMn 2 WV	1180	850	空冷	坑冷	砂冷
16 SiMn 2 WV	1150	800	坑冷	砂冷	炉冷
15 SiMn 3 MoWV	1200	900	坑冷	砂冷	炉冷
37 SiMn 2 MoWV	1170	800	坑冷	砂冷	炉冷
20 Mn 2 B	1180	850	空冷	坑冷	砂冷
20 MnVB	1200	850	空冷	坑冷	砂冷
20 SiMnVB	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
20 MnMoB	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
40 MnB	1150	850	空冷	坑冷	砂冷
45 MnB	1150	850	空冷	坑冷	砂冷
40 MnVB	1150	850	空冷	砂冷	砂冷
40 MnWB	1125	850	空冷	砂冷	砂冷
38 CrSi	1170	830	空冷	坑冷	砂冷
40 CrSi	1170	830	空冷	坑冷	砂冷
15 CrMn	1220	800	空冷	空冷	坑冷
20 CrMn	1220	800	空冷	空冷	坑冷
40 CrMn	1180	830	空冷	坑冷	砂冷
20 CrMnSi	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
25 CrMnSi	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
30 CrMnSi	1160	820	空冷	砂冷	砂冷
35 CrMnSi	1160	820	空冷	砂冷	砂冷
15 CrMn 2 SiMo	1200	900	空冷	坑冷	砂冷
20 CrV	1220	800	空冷	空冷	坑冷
40 CrV	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
45 CrV	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
50 CrV	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
20 CrMnTi	1180	850	空冷	坑冷	砂冷
30 CrMnTi	1180	850	空冷	坑冷	砂冷
12 CrMo	1230	820	空冷	空冷	坑冷
15 CrMo	1200	840	空冷	空冷	坑冷
20 CrMo	1200	840	空冷	坑冷	砂冷
30 CrMo	1180	840	空冷	砂冷	砂冷
35 CrMo	1180	840	空冷	砂冷	砂冷
42 CrMo	1150	850	空冷	砂冷	砂冷
12 CrMoV	1180	820	空冷	坑冷	砂冷

续上表

钢　　号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始　锻	终　锻	<100	100～200	200～300
12 Cr 1 MoV	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
24 CrMoV	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
25 Cr 2 MoV	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
25 Cr 2 Mo 1 V	1180	830	空冷	砂冷	砂冷
35 CrMoV	1160	850	空冷	砂冷	砂冷
38 CrMoAl	1160	850	空冷	砂冷	砂冷
15 Cr	1220	800	空冷	空冷	坑冷
20 Cr	1220	800	空冷	空冷	坑冷
30 Cr	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
35 Cr	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
38 Cr	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
40 Cr	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
45 Cr	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
50 Cr	1180	820	空冷	坑冷	砂冷
20 CrNi	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
40 CrNi	1150	830	空冷	砂冷	炉冷
45 CrNi	1150	830	空冷	砂冷	炉冷
12 CrNi 3	1200	800	空冷	坑冷	砂冷
20 CrNi 3	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
30 CrNi 3	1150	820	空冷	坑冷	砂冷
37 CrNi 3	1150	830	空冷	坑冷	砂冷
12 Cr 2 Ni 4	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
20 Cr 2 Ni 4	1180	800	空冷	坑冷	砂冷
40 CrNiMo	1150	850	空冷	砂冷	炉冷
45 CrNiMoV	1120	880	空冷	砂冷	炉冷
18 CrNiW	1180	830	空冷	砂冷	炉冷
25 CrNiW	1180	830	空冷	砂冷	炉冷

表 3.1.4-33　　弹簧钢、滚动轴承钢锻造温度范围

钢　号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始　锻	终　锻	<100	100～200	200～300
65	1180	800	空冷	—	—
70	1180	800	空冷	—	—
85	1120	800	空冷	—	—
60 Mn	1180	800	空冷	—	—
65 Mn	1180	800	空冷	—	—
55 Si 2 Mn	1150	830	空冷	—	—
60 Si 2 Mn	1150	830	空冷	—	—
50 CrMn	1180	800	空冷	—	—
50 CrVA	1180	800	空冷	—	—
50 CrMnVA	1150	830	空冷	—	—
65 SiCrA	1120	830	空冷	—	—
60 Si 2 CrVA	1120	830	空冷	—	—
30 MnCr 2 VA	1150	850	空冷	—	—
GCr 6	1120	820	空冷	砂冷	炉冷
GCr 9	1120	820	空冷	砂冷	炉冷
GCr 15	1120	820	空冷	砂冷	炉冷
GCr 9 SiMn	1120	820	空冷	砂冷	炉冷
GCr 15 SiMn	1120	820	空冷	砂冷	炉冷

表 3.1.4-34　**不锈耐酸钢和耐热不起皮钢锻造温度范围**

钢　号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始　锻	终　锻	<100	100~200	200~300
1 Cr 13	1180	880	空冷	坑冷	砂冷
2 Cr 13	1180	880	坑冷	砂冷	砂冷
3 Cr 13	1170	880	砂冷	砂冷	炉冷
4 Cr 13	1170	880	砂冷	砂冷	炉冷
4 Cr 9 Si 2	1150	900	坑冷	砂冷	砂冷
15 Cr 11 MoV	1180	880	空冷	砂冷	砂冷
4 Cr 10 Si 2 Mo	1150	870	坑冷	砂冷	炉冷
1 Cr 18 Ni 9	1180	900	空冷	空冷	空冷
2 Cr 18 Ni 9	1130	870	空冷	空冷	空冷
1 Cr 18 Ni 9 Ti	1150	900	空冷	空冷	空冷
1 Cr 18 Ni 12 Ti	1150	900	空冷	空冷	空冷
1 Cr 14 Ni 14 W 2 MoTi	1150	900	空冷	空冷	空冷
4 Cr 14 Ni 14 W 2 Mo	1130	900	空冷	空冷	空冷
Cr 15 Ni 36 W 3 Ti	1130	920	堆冷	坑冷	砂冷

表 3.1.4-35　**碳素工具钢、合金工具钢锻造温度范围**

钢　号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始　锻	终　锻	<100	100~200	200~300
T 7、T 7 A	1120	800	空冷	坑冷	砂冷
T 8、T 8 A	1120	800	空冷	坑冷	砂冷
T 8 Mn、T 8 MnA	1120	800	空冷	坑冷	砂冷
T 9、T 9 A	1100	820	空冷	坑冷	砂冷
T 10、T 10 A	1100	820	空冷	坑冷	砂冷
T 11、T 11 A	1080	850	坑冷	700℃以后砂冷	700℃以后砂冷
T 12、T 12 A	1080	850	坑冷	700℃以后砂冷	700℃以后砂冷
T 13、T 13 A	1080	850	坑冷	700℃以后砂冷	700℃以后砂冷
6 SiMnV	1120	820	空冷	坑冷	砂冷
5 SiMnMoV	1120	820	空冷	坑冷	砂冷
9 SiCr	1120	820	空冷	坑冷	砂冷
8 Cr 3	1150	850	空冷	坑冷	砂冷
Cr 12	1020	900	空冷	坑冷	砂冷
5 CrMnMo	1150	830	空冷	坑冷	砂冷
Cr 6 WV	1120	830	空冷	坑冷	砂冷
Cr 2 MnSi	1120	830	空冷	坑冷	砂冷
CrW	1120	830	空冷	坑冷	砂冷
Cr 12 W	1020	900	空冷	坑冷	砂冷
3 Cr 2 W 8	1150	850	空冷	坑冷	砂冷
CrWMn	1120	830	空冷	600℃以后坑冷	600℃以后坑冷
Cr 12 MoV	1100	880	空冷	坑冷	砂冷
4 CrVMoW	1150	850	空冷	坑冷	砂冷
5 CrNiMo	1150	830	空冷	坑冷	砂冷
3 W 4 Cr 2 V	1150	850	空冷	坑冷	砂冷

表 3.1.4-36 高速工具钢锻造温度范围

钢号	锻造温度（℃）		冷却，最大散热尺寸（mm）		
	始锻	终锻	<100	100～200	200～300
W 12 Cr 4 V 4 Mo	1180	900	坑冷	砂冷	炉冷
W 18 Cr 4 V	1180	900	坑冷	砂冷	炉冷
W 9 Cr 4 V 2	1180	900	坑冷	砂冷	炉冷
W 9 Cr 4 V	1180	900	坑冷	砂冷	炉冷

13 船用焊接件

1)焊缝代号（GB 324—64），焊接方法字母符号见表 3.1.4-37，焊缝有关尺寸符号见表 3.1.4-38。

表 3.1.4-37 焊接方法字母符号

焊接方法	字母符号	焊接方法	字母符号
手工电弧焊	S	气焊	Q
焊剂层下自动焊	Z	电渣焊	D
焊剂层下半自动焊	B	接触焊	J
二氧化碳气体保护焊	C	钎焊	H
氩弧焊	A	冷压焊	L
氢原子焊	Y	摩擦焊	M

表 3.1.4-38 焊缝有关尺寸符号

符号	名称	符号	名称
δ	厚度	L	焊缝长度
b	焊缝宽度、焊槽宽度	t	点焊或断续焊缝中心距
d	焊点直径	a	焊点至板边的中心距
R	U形坡口圆弧半径	α	坡口角度
n	焊缝的条（点、排）数	h	坡口高度
N	有关标准的焊缝序号	p	钝边高度
K	焊脚高度	c	间隙

2)焊接材料：用于船体结构的一般强度钢和高强度钢，以及用于锅炉、受压容器钢材和主要机件上的焊条、焊丝、焊剂等材料均应符合表 3.1.4-39 规定。

表 3.1.4-39 焊接材料分级和检验项目

焊接材料	焊接项目	分级	检验项目 ≥					说明
			屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b	伸长率 δ_5	V型冲击试验		
			(MPa)		(%)	温度(℃)	平均功(J)	
手工电弧焊条	熔敷金属	I 41 II 41 III 41	305	400～560	22	20 0 −20	47	试样试板按图 3.1.4-2 焊制和截取
		II 47 III 47	375	460～660	22		47	

焊接材料	焊接项目	分级	检验项目 ≥ 屈服强度 σ_s (MPa)	 抗拉强度 σ_b (MPa)	 伸长率 δ_5 (%)	V型冲击试验 温度(℃)	 平均功(J)	说明
手工电弧焊条	对接试板	I 41 II 41 III 41		横向拉力试验 400		20 0 −20	平焊横焊 47 立焊 34	试样试板按图 3.1.4-3 和 3.1.4-4 焊制和截取，弯曲试验，试样的受拉面没有出现 3 mm 大小的裂纹或其他缺陷合格
		II 47 III 47		490		0 −20	47 34	
	角接焊缝							按熔敷金属和对接试板项目进行试验外，进行角接焊缝试验，检验焊缝根部的熔合情况及焊缝横截面缺陷，硬度测试
	深熔焊条							按对接试板拉力、冲击、弯曲试验项目进行试验
埋弧自动焊的焊丝—焊剂	多道焊工艺熔敷金属	I 41 M II 41 M III 41 M	305	400～560	22	20 0 −20	34	试样试板按图 3.1.4-5 焊接和截取
		I 47 M II 47 M III 47 M	375	460～660	22	20 0 −20	34	
	多道焊工艺对接试板	I 41 M II 41 M III 41 M		横向拉力试验 400		20 0 −20	34	标明横向拉力试验断裂位置 冷弯试验，试样受拉面上不应存在 3 mm 大小的裂纹和缺陷 试样试板按图 3.1.4-6 焊接和截取
		I 47 M II 47 M III 47 M		490		20 0 −20	34	
	双面单道焊							拉力试验，冲击试验，弯曲试验，按多道焊对接试板项目进行
半自动、自动焊焊丝	多道半自动焊							按手工电弧焊条熔敷金属，对接试板、角接焊缝项目要求试验
	多道自动焊							按埋弧自动焊多道焊工艺进行熔敷金属，对接试板性能要求试验
	双面单道自动焊							按埋弧自动焊焊丝双面单道焊要求项目进行

续上表

焊接材料	焊接项目	分级	检验项目 ≥ 屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_t (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	V型冲击试验 温度(℃)	V型冲击试验 平均功(J)	说明
电渣焊或气电焊的焊接材料	对接	Ⅰ 41 Ⅱ 41 Ⅲ 41	305	400～560 ≥400(横向)	22	20 0 −20	34	按埋弧自动焊的双面单道焊规定试验 列出横向拉力试样拉断位置 弯曲试验，受拉面上没有出现超过 3 mm大
	焊缝	Ⅰ 47 Ⅱ 47 Ⅲ 47	375	≥490 ≥490(横向)	22	20 0 −20	34	小裂纹 试样试板按图 3.1.4-7 和图 3.1.4-8 焊接和截取
单面焊接双面成型的焊接材料								机械性能按电渣焊焊接材料项目要求进行
奥氏体不锈钢的焊接材料	熔敷金属		$\sigma_{0.2}$ / $\sigma_{1.0}$					1)被焊材料为:
		AS 51-A	270 / 310	500	25	−196	29	00 Cr 18 Ni 10
		AS 51-B	270 / 310	500	22	−196	29	00 Cr 17 Ni 14 Mo 3
		AS 56-A	290 / 330	550	22	−196	29	1 Cr 18 Ni 9 Ti
		AS 56-B	290 / 330	550	22	−196	29	1 Cr 18 Ni 11 Nb
	对接焊缝试板			横向拉力试验				2)伸长率δ_5
		AS 51-A		440		−196	27	试样标距为 50 mm
		AS 51-B		440		−196	27	
		AS 56-A		490		−196	27	
		AS 56-B		490		−196	27	

3)重要部位及重要部件焊接要求：船舶重要部位（如首柱、尾柱、甲板、柴油机主机基座、起重桅等)焊接要求见表 3.1.4-40；锅炉及受压容器的焊接要求见表 3.1.4-41；重要机件（如转子轴、机座、气缸、壳体及压力管系等）焊接要求见表 3.1.4-42。

表 3.1.4-40 **船舶重要部位焊接要求**

项目	焊接要求
首柱、尾柱、舵杆、尾轴架(铸钢或锻钢)	1)焊件的含碳量≥0.23%或刚性较大时，焊前预热和保温 2)采用手工焊方法，焊后进行回火处理；采用电渣焊方法，焊后进行正火—回火处理 3)焊接接头进行无损探伤
首柱、尾柱、舵杆、尾轴架(碳钢或高强度热轧钢)	1)所有对接焊缝上采用低氢焊条 2)焊件焊后，必须进行退火处理以消除焊接时的残余应力，退火温度应达临界温度以上，然后缓慢冷却
船顶列板与强力甲板边板	1)焊接角接时，在船中的 0.5 L区域内，强力甲板的边缘应开坡口，保证完全焊透 2)焊接采用园弧形结构对接时，对接焊缝处开坡口并保证完全焊透。在近船首、尾处改为直角形式与甲板连接时，应有足够长度的圆弧形过渡区

项　　目	焊　接　要　求
柴油机主机基座的焊接	1)主机基座纵桁腹板厚度≥14 mm时，水平面板与纵桁腹板角接处，应在腹板的边缘开坡口，完全焊透 2)与主机基座相连接的其它各构件（如船底板，肋板、肘板、隔板等）的角焊缝，其焊喉厚度应不小于 $0.44t_p$（t_p为构件最小厚度）
小夹角处的角焊缝（构件的夹角小于50°）	1)内底边板与舭侧外板的角接焊缝，其坡口角度应不小于45°，若小于45°，可将内底边板的边缘开坡口，进行多道单面连续角焊 2)肘板的角接缝遇到小夹角时，可在钝角位置的一面施焊，在肘板的趾端应有足够长度的包角焊缝
起重桅（柱）的焊接	1)钢板弯制的起重桅(柱)，其柱体的纵向、横向焊缝应为单面坡口的对接缝，且完全焊透 2)若桅（柱）之根部不贯穿甲板、且直接焊于弹力甲板上时，则根部边缘应开单面坡口，保证完全焊透 3)若桅（柱）贯穿强力甲板时，与桅连接处的强力甲板开双面坡口，采用双面连续角焊。桅的根部开单面坡口，采用单面连续角焊。上述焊缝完全焊透
高强度钢的焊接	1)锰-碳型钢材的碳当量值为 $碳当量=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15}\%$ 碳当量<0.41%时，采用高强度焊条 碳当量 0。41~0.45%，采用低氢高强度焊条 碳当量>0.45%，采用低氢高强度焊条，焊前预热 2)角接焊缝：在填角焊缝的端部、“T”形连接处，主要构件的连接焊缝及交叉焊缝处，进行磁粉探伤或超声波等探伤 对接缝、高约束力区焊缝，进行射线检查

表 3.1.4-41　**锅炉及受压容器的焊接要求**

<table>
<tr><th rowspan="2">项　目</th><th colspan="2">锅炉及受压容器</th><th>受压容器</th><th rowspan="2" colspan="3">说　　明</th></tr>
<tr><th>I级</th><th>II级</th><th>III级</th></tr>
<tr><td>熔敷金属的拉力试验</td><td colspan="2">1)抗拉强度σ_b:
不小于母材的标定抗拉强度下限值，且不大于母材的标定抗拉强度下限值加上 145 MPa
2)伸长率:
$\delta \geq \frac{980-\sigma_b}{21.6}$
且不低于母材伸长率最小值的 80%。</td><td></td><td colspan="3">试样按图 3.1.4-9 截取</td></tr>
<tr><td>正向弯曲</td><td colspan="3">试样按试板的抗拉强度下限值选取压头直径和支辊边内间距后，由压头作垂直于试样加压至通过支辊使试样完全弯曲为止</td><td>σ_b标定下限值 MPa</td><td>压头直径</td><td>支辊边内间距</td></tr>
<tr><td rowspan="2">反向弯曲</td><td colspan="3" rowspan="2">试样弯曲后，裂纹或缺陷的大小沿横向测量不得超过 1.5 mm，沿纵向测量不得超过 3 mm</td><td><46</td><td>2t①</td><td>1.2t</td></tr>
<tr><td>460~510</td><td>3t</td><td>5.2t</td></tr>
<tr><td>焊接接头的横向拉力试验</td><td colspan="3">焊接接头的抗拉强度应不低于母材的标定抗拉强度下限值</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>宏观检查</td><td colspan="3">不得有未焊透、未熔合、较大的夹渣或其它缺陷</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>冲击试验</td><td>常温冲击试验，其平均功≥27 J</td><td></td><td></td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>断口组织</td><td></td><td></td><td>断口组织均匀，且不得有熔渣、夹渣、气孔和粗晶粒等缺陷</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

① t为试样厚度，mm。

续上表

<table>
<tr><th rowspan="2">项　　目</th><th colspan="2">锅炉及受压容器</th><th>受压容器</th><th rowspan="2">说　　明</th></tr>
<tr><th>Ⅰ级</th><th>Ⅱ级</th><th>Ⅲ级</th></tr>
<tr><td rowspan="2">X射线透视</td><td>所有筒体、鼓筒、联箱、接管的纵缝和环缝，连同试板应作100%检查当联箱、接管及其他筒形构件的外径≤170 mm时，其模压接头的环缝作10%的抽查</td><td>试板应作100%的检查对接焊缝应作≥10%的抽查</td><td></td><td rowspan="4">锅炉及受压容器经无损探伤后，如发现有不允许存在的焊缝缺陷时，对Ⅰ级锅炉及受压容器焊缝内的缺陷应铲除干净，补焊后再次作射线透视检查；对Ⅱ级锅炉及受压容器焊缝发现缺陷，再任选两段检查。如再次检查合格，则将缺陷处铲除修补，修补后进行复查；如再次检查不合格，则将发现缺陷所代表的整个焊缝铲除修补或整个焊缝X透视检查，将缺陷铲除修补，并重新通过X射线检查</td></tr>
<tr><td colspan="3">炉胆、燃烧室以及其他类似的受压部件，应作局部抽查</td></tr>
<tr><td>超声波探伤</td><td>板厚超过50 mm，可用超声波代替X射线检查。必要时仍选择局部焊进行射线透视</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>磁粉探伤或着色检查</td><td colspan="3">管柱、复板、短管和支管等焊缝未经X射线检查者，应作10%磁粉探伤或着色检查的抽查</td></tr>
</table>

表 3.1.4-42　**重要机件的焊接要求**

项　　目	焊　接　要　求
转子轴	1)施焊前，焊制试样并进行熔敷金属拉力试验，横向拉力试验，正弯及反弯试验，以及宏观组织检查 2)焊接前，均匀预热，焊接过程中严格保温。焊后探伤修补 3)焊接后热处理 4)精加工前应经磁粉探伤，如发现裂纹或缺陷必须彻底清除修补，并进行热处理以消除应力。
机座、机架、汽缸、壳体等构件	1)制备模拟接头，进行拉力、弯曲、冲击和宏观检查试验： 拉力试验　不低于母材的标定抗拉强度下限值 冲击试验　不低于母材的最小平均冲击功 弯曲试验　受拉面不存在3 mm大小裂纹和缺陷 宏观检查　不得有裂纹和未焊透、未熔合以及不应存在的咬边和夹渣等缺陷 2)汽轮机汽缸的对接接头进行拉力、弯曲和宏观检查的焊接试验 3)汽轮机的隔板、喷嘴板等应挑选有代表性的试样，进行切片和宏观浸蚀检查，并进行无损探伤检查
压力管系	1)对合金钢的管接头及分管接头，应作机械试验和破坏性试验，以验证是否具有足够强度 2)管子的对接接头进行X射线透视检查或超声波探伤检查。管子外径>76 mm时，焊缝100%进行检查；管子外径≤76 mm时，抽检

14　铸铁件种类及其在船机上的应用

船用铸铁件可用灰铸铁、球墨铸铁或其他特殊铸铁制造。灰铸铁应符合（GB 976—67）和（GB 977—67）技术标准，灰铸铁牌号及机械性能见表 3.1.4-43，化学成分见表 3.1.4-44，灰铸铁件试验项目按表 3.1.4-45 要求进行。球墨铸铁应符合（GB 1348—73）技术标准，球墨铸铁牌号和机械性能见表 3.1.4-46，船用重要球墨铸铁件按表 3.1.4-47 要求进行试验。船机中某些零部件，如气缸套、活塞、炉条、阀门等，需具有耐磨、耐热或耐腐蚀性能，可采用表 3.1.4-48 中耐磨铸铁、耐热铸铁或耐蚀铸铁制造。

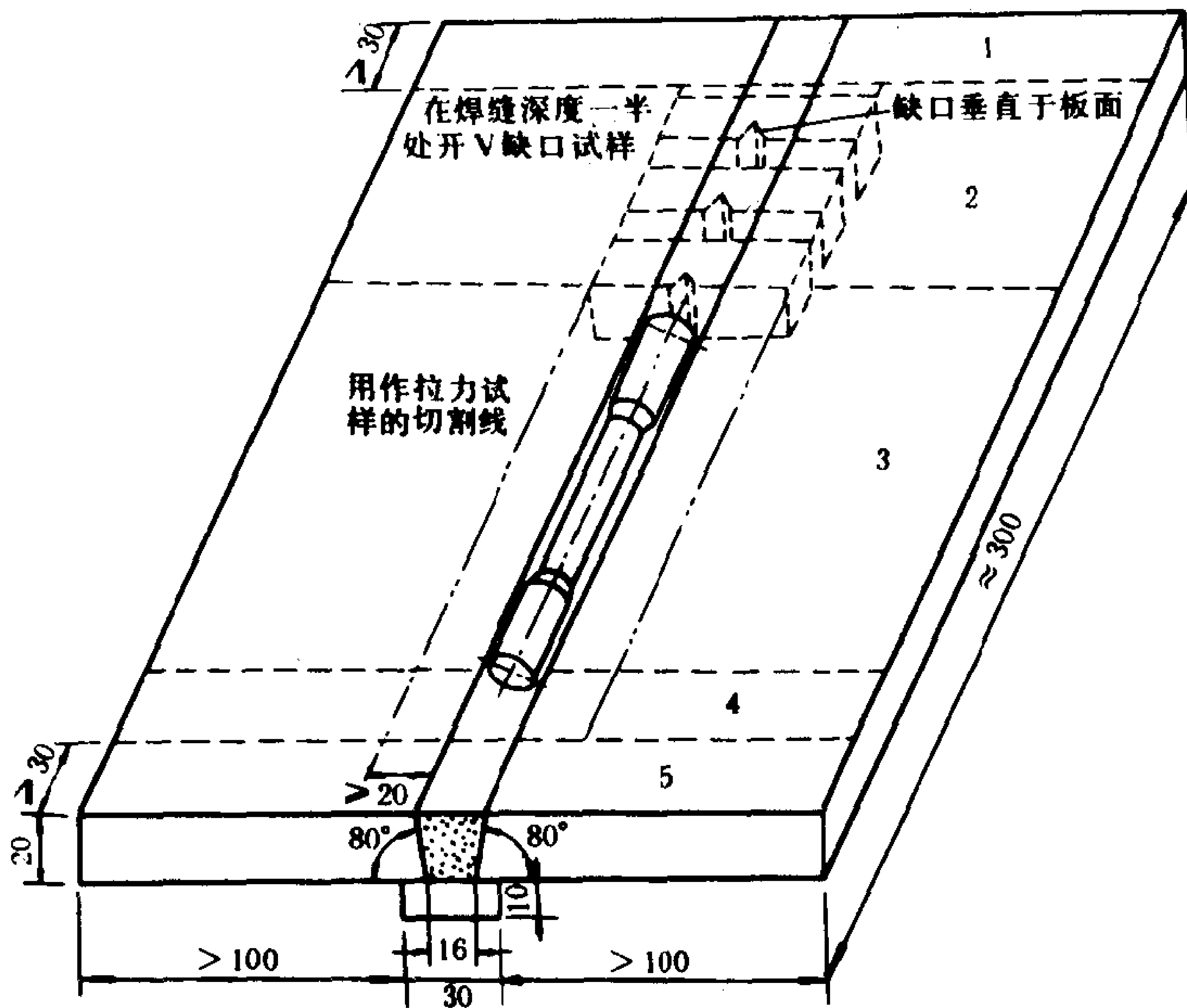


图 3.1.4-2 手工焊熔敷金属试板
1、5-截弃段；2-冲击试样；
3-拉力试样；4-化学分析试样；

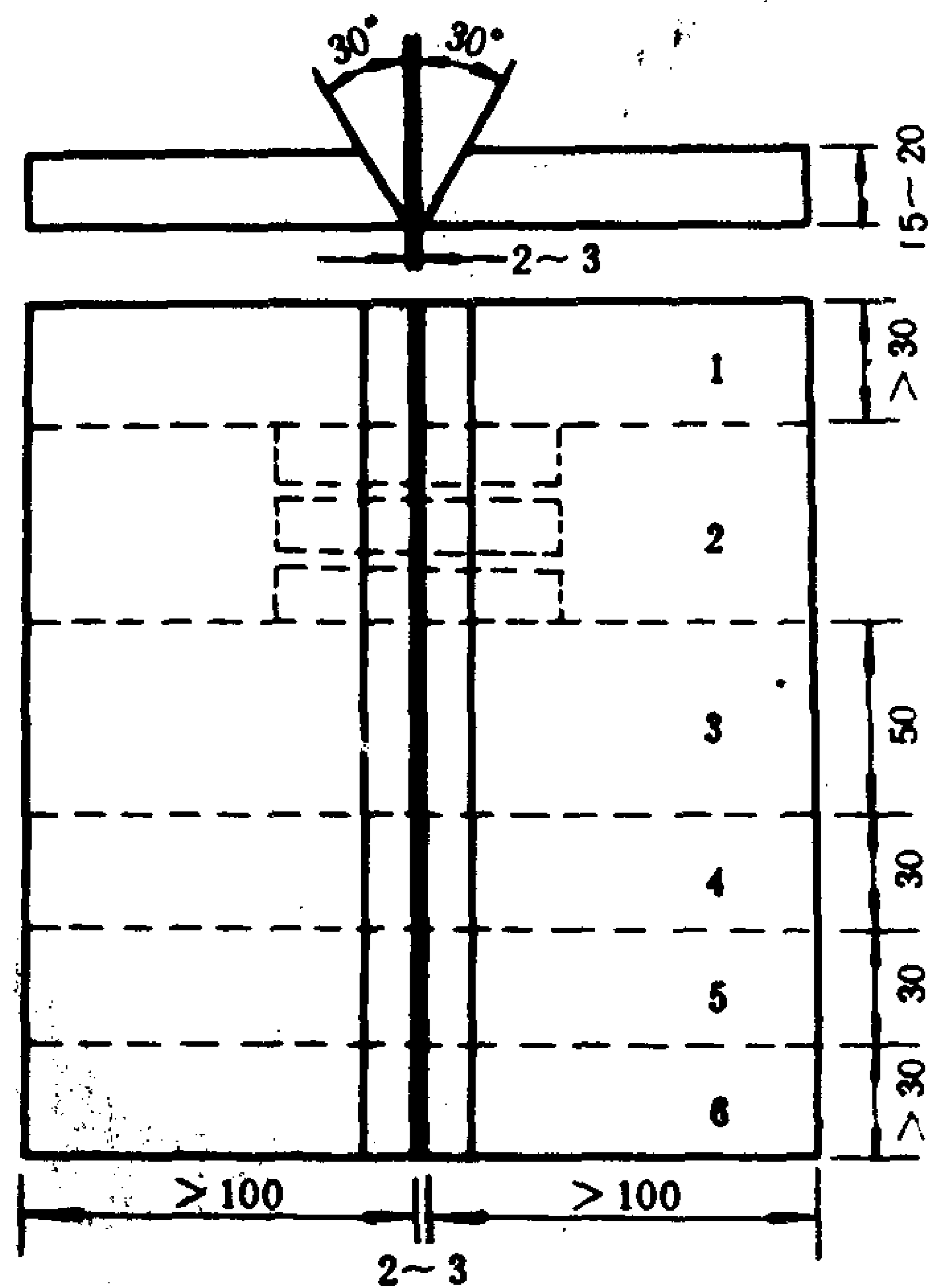


图 3.1.4-3 手工焊对接试板
1、6-截弃段；2-V缺口冲击试样；
3-横向拉力试样；4-正弯试样；
5-反弯试样

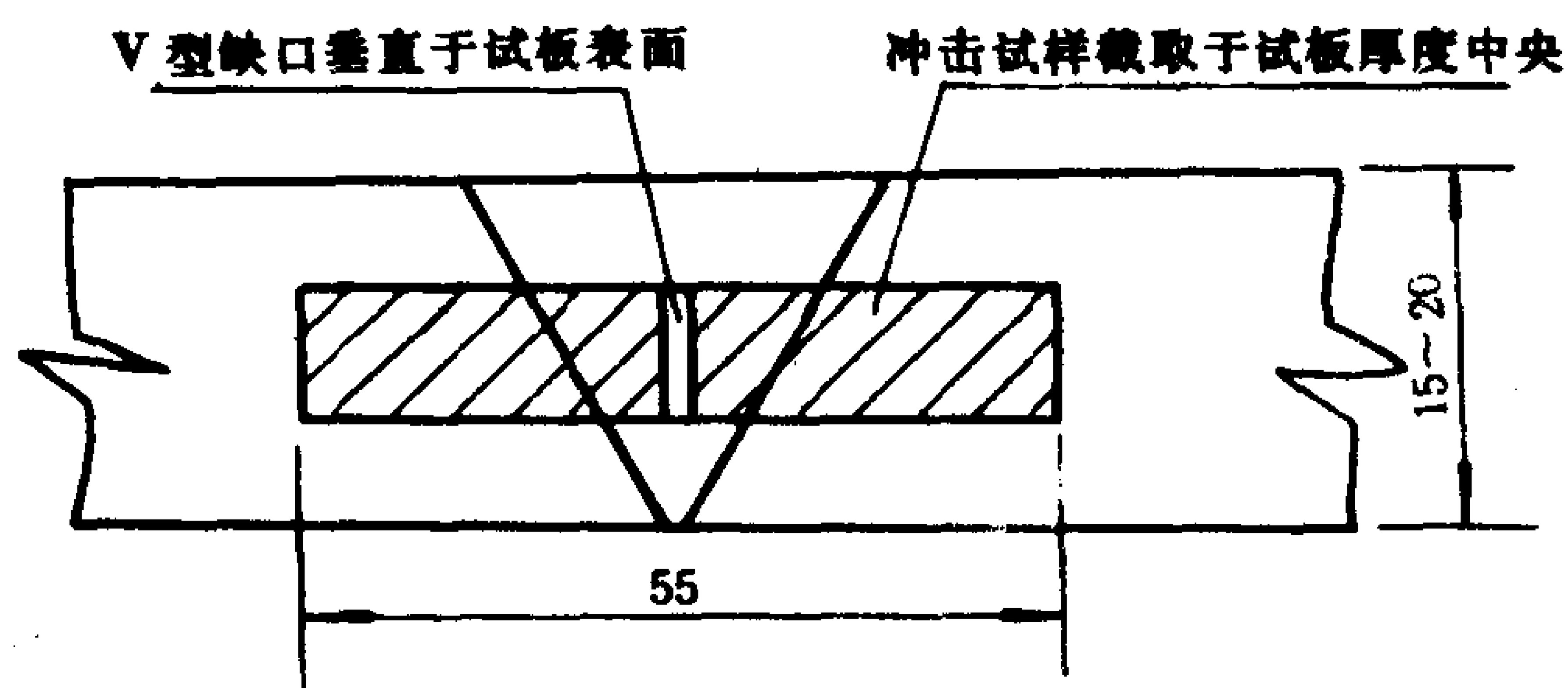


图 3.1.4-4 手工焊对接试板截取方法

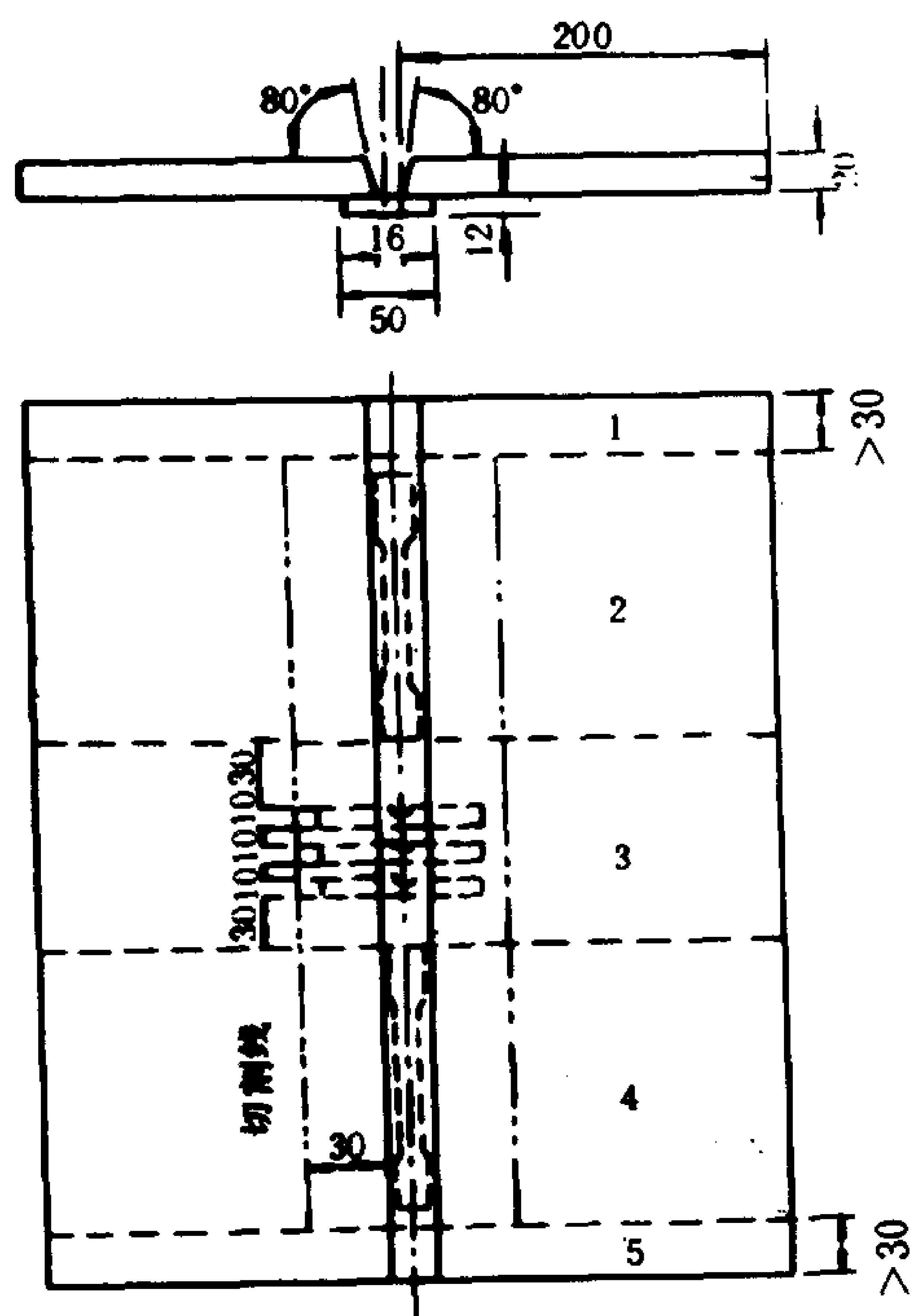


图 3.1.4-5　埋弧焊多道焊熔敷金属试板

1、5-截弃段；2、4-纵向拉力试样；3-冲击试样

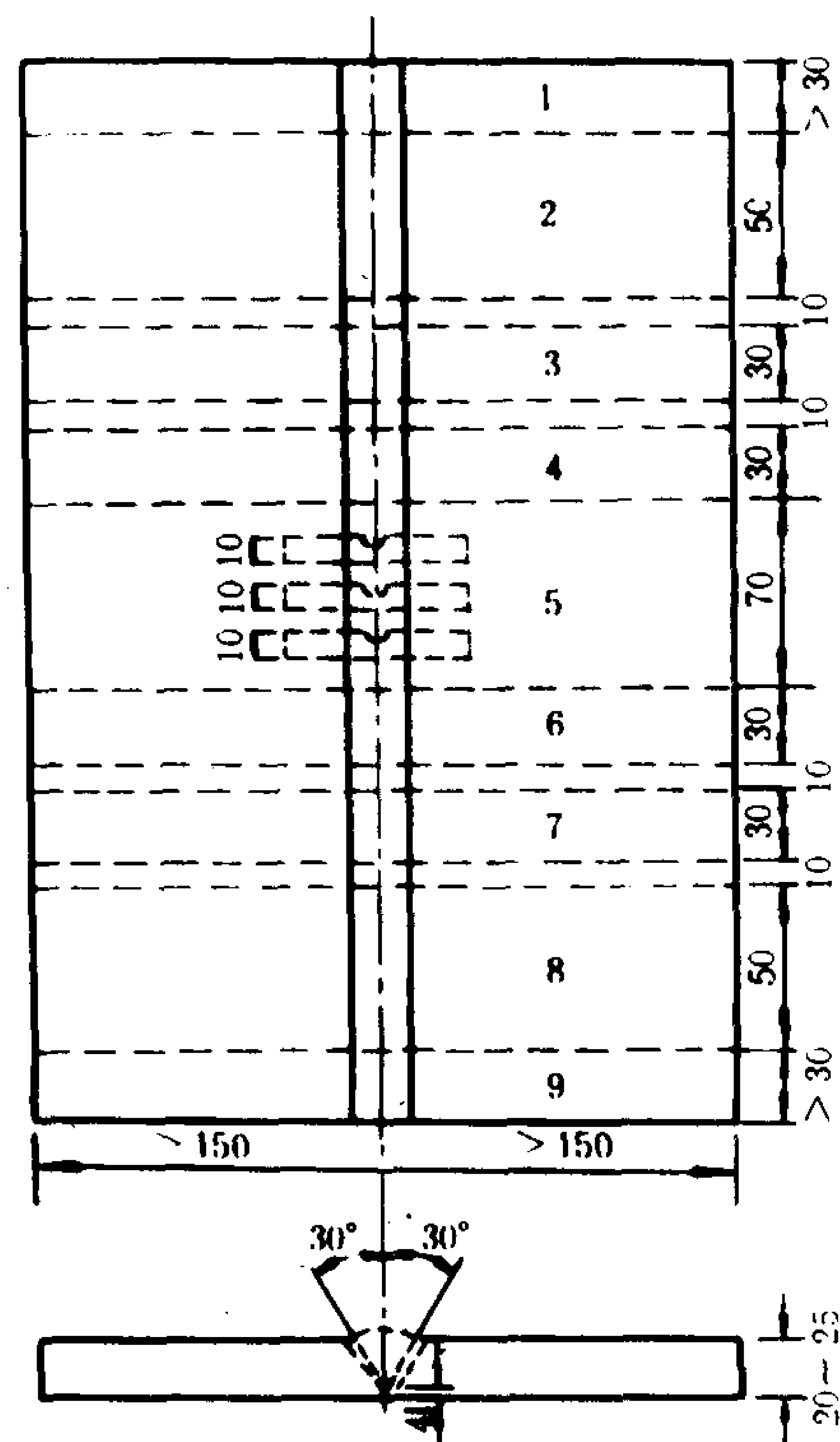


图 3.1.4-6　埋弧焊多道焊对接试板

1、9-截弃段；2、8-横向拉力试样；3、7-正弯试样；4、6-反弯试样；5-V缺口冲击试样

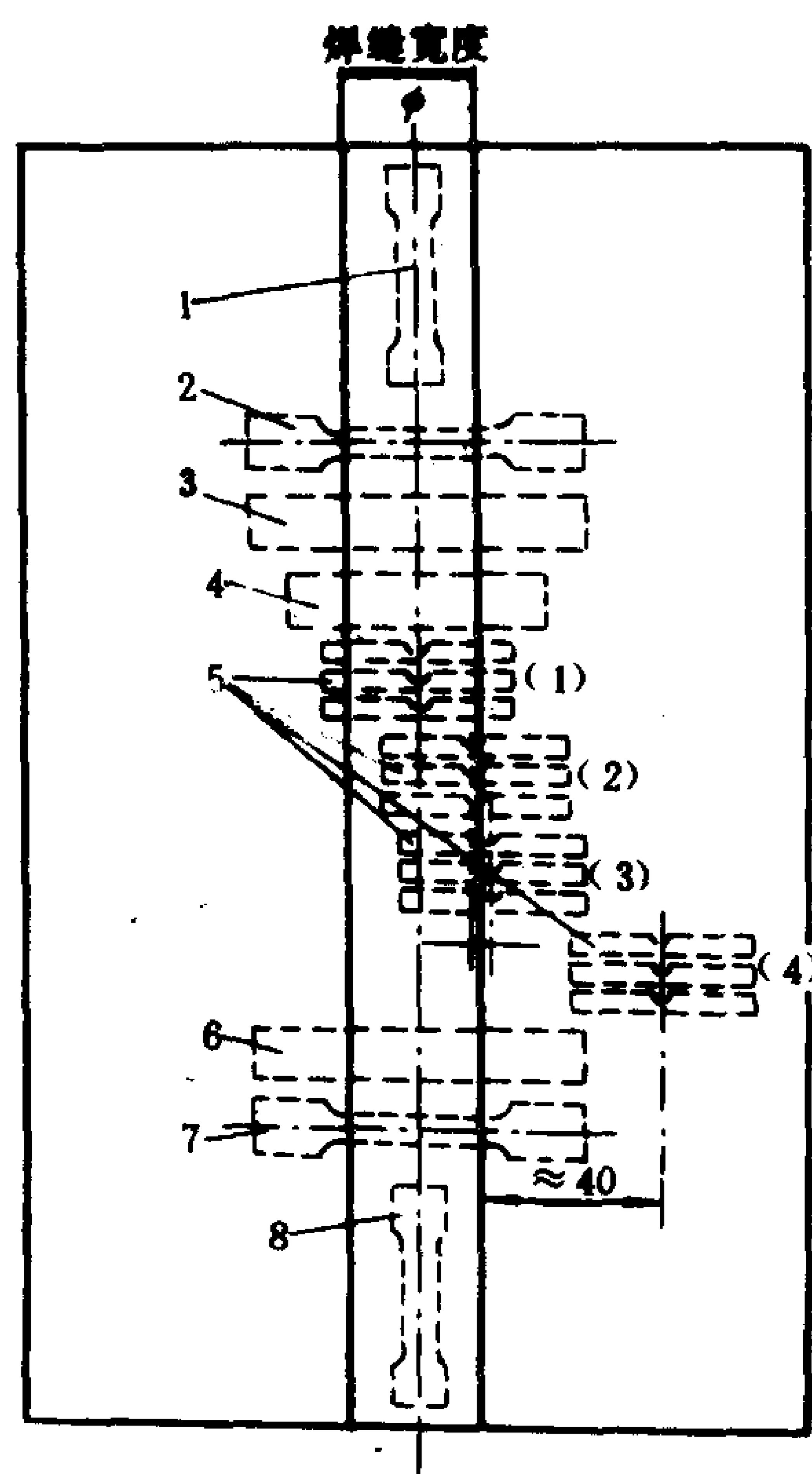


图 3.1.4-7　电渣焊对接试板

1、8-纵向拉力试样；2、7-横向拉力试样；3、6-弯曲试样；4-宏观试样；5-V缺口冲击试样（共4组）

焊缝中心线

在焊缝中心线上

在焊缝金属上，距熔合线2

在热影响区，距熔合线2

在母材上



图 3.1.4-8 电渣焊试板截取方法

焊缝中心线

≥30

约400（按实际需要决定）

约300

（与试验机配合）

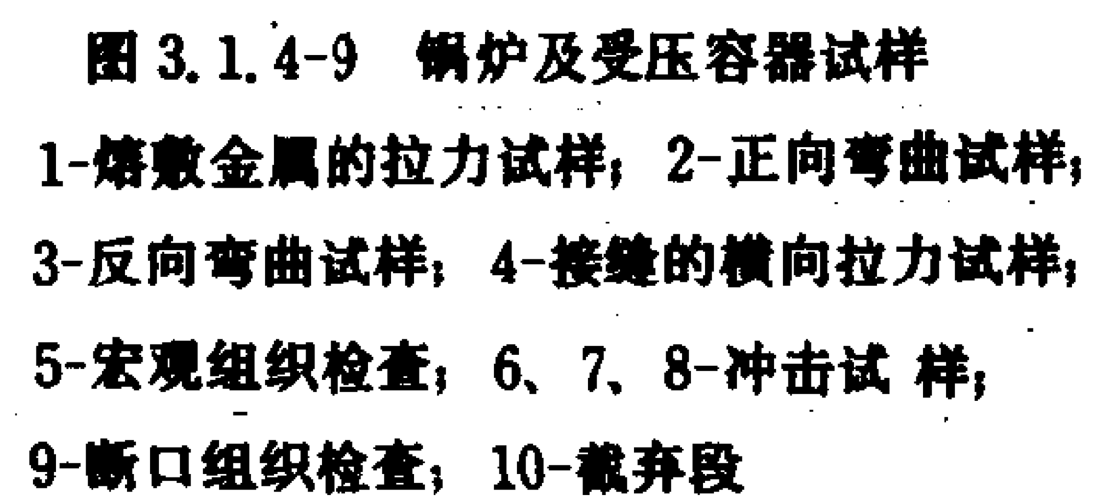


图 3.1.4-9 锅炉及受压容器试样

1-熔敷金属的拉力试样；2-正向弯曲试样；
3-反向弯曲试样；4-接缝的横向拉力试样；
5-宏观组织检查；6、7、8-冲击试 样；
9-断口组织检查；10-截弃段

表 3.1.4-43 **灰铸件牌号及机械性能**

灰铸铁牌号	铸件主要壁厚 (mm)	试样毛坯直径D (mm)	抗拉强度(MPa) ≥	抗弯强度(MPa) ≥	挠度支距=10D (mm) ≥	硬度 HB
HT 100 (HT 10-26)	所有尺寸	30	98	255	2	143～249
HT 150 (HT 15-33)	4～8	13	275	461	1.5	170～241
	>8～15	20	196	382	2	170～241
	>15～30	30	147	324	2.5	163～229
	>30～50	45	118	245	3	163～229
	>50	60	98	206	4	143～229
HT 200 (HT 20-40)	6～8	13	314	520	1.8	187～255
	>8～15	20	245	441	2.5	170～241
	>15～30	30	196	392	2.5	170～241
	>30～50	45	177	333	3	170～241
	>50	60	157	304	4.5	163～229
HT 250 (HT 25-47)	>8～15	20	284	490	2.8	187～255
	>15～30	30	245	461	2	170～241
	>30～50	45	216	419	4	170～241
	>50	60	196	382	4.5	163～229
HT 300 (HT 30-54)	>15～30	30	294	530	3	187～255
	>30～50	45	265	490	4	170～241
	>50	60	255	471	4.5	170～241
HT 350 (HT 35-61)	>15～30	30	343	598	3.5	197～269
	>30～50	45	314	549	4	187～255
	>50	60	304	530	4.5	170～241

注：①“HT”系指灰铁二字汉语拼音的第一个字母，灰铸铁牌号系指以直径为 30 mm毛坯制取的试样所能达到的机械性能指标，数字表示抗拉强度（MPa）。

②表中所列各项数据供设计人员选择灰铸铁牌号之用，不作为验收依据。

③灰铸铁件机械性能按GB 977—67 技术标准进行试验。

表 3.1.4-44 **灰铸铁化学成分参考数据**

灰铸铁牌号	化学成分参考数据(%)					应用举例
	C	Si	Mn	P	S	
HT 100 (HT 10-26)	3.5～3.7	2.2～2.5	0.4～0.6	<0.4	<0.15	用于低载荷、形状简单的零件，如盖、手轮、支架等
HT 150 (HT 15-33)	3.1～3.5	2.0～2.4	0.5～0.8	<0.3	<0.15	端盖、泵体、轴承座、阀壳、管子及管路附件、手轮；一般船机底座、齿轮箱及其它复杂零件、工作台等
HT 200 (HT 20-40)	2.9～3.3	1.5～2.0	0.6～0.9	<0.3	<0.12	气缸、齿轮、底架、机体、飞轮、齿条、衬筒；及中等压力（8 MPa以下）液压筒、液压泵和阀的壳体等
HT 250 (HT 25-47)	2.8～3.2	1.4～1.8	0.8～1.1	<0.2	<0.12	阀壳、油缸、气缸、联轴器、机体、齿轮、齿轮箱外壳、飞轮、衬筒、凸轮、轴承座等
HT 300 (HT 30-54)	2.7～3.2	1.2～1.5	0.8～1.1	<0.15	<0.12	用于承受高应力的重要铸件，如大型柴油机曲轴、缸体、缸套、高压液压筒、液压泵、和滑阀的壳体等，以及齿轮、凸轮、机体、机座等
HT 350 (HT 35-61)	2.7～3.1	1.0～1.4	0.9～1.2	<0.15	<0.1	

表 3.1.4-45　　灰铸铁件试验项目

铸　件　名　称	试验项目
柴油机机架、机座、气缸盖、齿轮箱箱体、尾轴管	拉力试验
柴油机气缸体、气缸套、活塞、活塞环、导板、螺旋桨	1)硬度试验 2)拉力试验

注：①每个铸件或每批铸件应提供所要求的试验和可能重复试验的足够的试样。
②试块可以分开浇铸，试块形状一般为直径 30 mm和有适当长度的圆捧。
③对多于一罐铁水浇铸的大型铸件，则每罐也应至少提供一个试块。
④可按批浇铸试块，同一批所有铸件应是同类型的和尺寸相同的并用同一罐铁水浇铸的。
⑤如果铸件在热处理后供货，则试块应与铸件一起进行热处理。

表 3.1.4-46　　球墨铸铁件牌号和机械性能

牌号	抗拉强度σ_b	屈服强度$\sigma_{0.2}$	伸长率δ_5	冲击韧值a_k	硬度	基　体	用　途
	MPa	MPa	%	J/cm²	HB		
	不小于						
QT 40-17 QT 42-10	392 412	245 265	17 10	60 30	<197 <207	铁素体	可用于制造 1.6～6.4 MPa的阀门阀体、阀盖，压缩机的气缸、输气管、柴油机零件
QT 50-5	490	343	5	—	147～241	铁素体＋珠光体	制造机油泵齿轮、水轮机阀体、轴瓦等
QT 60-2 QT 70-2 QT 80-2	588 686 785	419 481 549	2 2 2	— — —	229～302 231～304 241～321	珠光体	制造 3.7～2950 kW柴油机、汽油机的曲轴，轻型柴油机、汽油机的凸轮轴，空压机、气压机、冷冻机、泵的曲轴、球磨机齿轮、各种滚轮、各种凸轮轴、气缸套、活塞环等
QT 120-1	1177	824	1	30	HRC≥38	下贝氏体	制造齿轮、柴油机和汽油机凸轮轴等

注：牌号中的"QT"是"球铁"两字汉语拼音的第一个字母。字母后的第一项数字代表最低抗拉强度（kgf/mm²），第二项数字代表最低延伸率（δ_5，%）。

表 3.4.1-47　　船用重要球墨铸铁件试验项目

铸　件　名　称	试验项目
柴油机的气缸体、气缸套、活塞、联轴器、螺旋桨	1)拉力试验 2)硬度试验

注：①每个铸件或每批铸件应提供所要求试验和可能重复试验的足够的试样。
②分开浇铸的试块形状一般分为U型和V型两种。
③多于一罐铁水浇铸的大型铸件，则每罐也应至少提供一个试快。
④可按批浇铸试块，同批的所有铸件应是同类型的和尺寸相同并用同罐铁水浇铸的。
⑤如果铸件在热处理后供货，则试块应与铸件一起热处理。
⑥金相组织试验表明至少 90%的石墨呈分散性的球状或团状。

球墨铸铁曲轴附加技术规定：

①柴油机和制冷压缩机球墨铸铁曲轴材料的标定抗拉强度下限值应不小于 490 MPa。

②曲轴铸件应进行消除内应力的热处理。如果试样与铸件分开浇铸，则试样应与铸件一

起进行热处理。

③如果球墨铸铁曲轴的轴颈和曲轴销进行表面处理，则应将详细的有关资料送交验船部门审查。

④对大型曲轴铸件，每个铸件的试块应从铸件本体截取或附浇在铸件上。

⑤对于每个质量不超过 100 kg，批量生产的小型曲轴铸件，可浇铸成块。除做拉力试验外，还应在每个铸件上进行硬度试验。

⑥铸铁曲轴的缺陷不允许补焊，瑕疵不能用充填物嵌填。

表 3.1.4-48　**特殊铸铁化学成分与应用举例**

名称	牌　号	化学成分　(%)							用　途
		C	Si	Mn	P	S	Cr	其他	
耐磨铸铁	高磷铸铁 Cu-Cr-Mo合金铸铁 MT-4	2.9~3.2 3.2~3.6 3.0~3.4	1.4~1.7 1.3~1.8 1.5~2.0	0.7~0.9 0.5~1.0 0.6~0.9	0.35~0.65 ≤0.3 ≤0.3	≤0.12 ≤0.15 ≤0.14	0.2~0.9 Cu 1.0~1.3	Mo 0.3~0.7 Cu 0.6~1.1 Mo 0.4~0.6	用于制造一般耐磨零件，如气缸套、活塞、活塞环、凸轮轴、卷扬机卷筒、柴油机密封圈等
耐热铸铁	RTCr-0.8	2.8~3.6	1.5~2.5	<1.0	<0.3	<0.12	0.5~1.1		600℃以下的空气、炉气介质中工作的零件
	RTCr-1.5	2.8~3.6	1.7~2.7	<1.0	<0.3	<0.12	1.2~1.9		650℃以下的空气、炉气介质中工作的零件
	RTSi-5.5	2.2~3.0	5.0~6.0	<1.0	<0.2	<0.12	0.5~0.9		850℃以下的空气、炉气介质中工作的零件
	RQTSi-5.5	2.4~3.0	5.0~6.0	<0.7	<0.2	<0.3			950℃以下的空气、炉气介质中工作的零件
耐蚀铸铁	NSTSi 15	0.6~0.85	14.25~15.5	0.3~0.8	≤0.08	≤0.05			耐腐蚀性高，除高温盐酸与氢氟酸外，其它介质均可应用
	高硅铜铸铁GT合金	0.5~0.8	13.50~15.0	0.5~0.8	≤0.07	≤0.05		Cu 6.5~8.5	耐碱及硫酸腐蚀
	铝铸铁	2.8~3.3	1.2~2.0					Al 4~6	耐碱腐蚀性高，如氯化铵等
	高铬合金不锈铸铁	0.87	1.55	0.26	0.048	0.026	22.13	Mo 2.07 Cu 1.66	除盐酸、氢氟酸中不能使用，其他介质均可应用

第5章　轮机常用有色金属和合金

有色金属与钢铁相比较具有许多特性。如银、铜、铝具有高的导电性；铝和钛的合金密度小，比强度高；镍、钼、铌和钴及其合金具有高的高温强度等等。因此，有色金属及其合金在工业中具有极大的重要性，其用量正在日益增大。

1　铝和铝合金的应用和热处理

1.1　纯铝

纯铝为银白色金属，有优良的导电和导热性能，其导电性仅次于银和铜；相对密度小(2.7)；抗大气腐蚀；塑性好，易于承受各类压力加工；焊接性能良好。然而纯铝的强度低，不宜制作机械零件，主要用作导线和配制铝合金。

纯铝冶炼产品的类型、代号、化学成分、机械性能、物理性能和用途见表3.1.5-1、表3.1.5-2和表3.1.5-3。

表3.1.5-1　　纯铝冶炼产品的类型、代号、成分和用途

代号	化学成分(%)							用途
	Al	杂质含量，不大于						
	不小于	Fe	Si	Fe+Si	Cu	其它	总和	
高纯铝(YB 1710—78)								
A 1-05	99.999	3.0①	3.0①	Zn 1.0①	3.0①	Pb 0.5① Ti 0.8① Ga 0.5①	10①	主要用于科学试验、化学、电子及其它特殊用途
重熔用铝锭(GB 1196—83)								
A 199.7	99.7	0.16	0.13	0.26	0.01	—	0.30	制造铝箔、铝合金、防锈用的包铝材料、电缆和导电体、特殊用途的铝合金
A 199.6	99.6	0.25	0.18	0.36	0.01	—	0.40	
A 199.5	99.5	0.30	0.22	0.45	0.015	—	0.50	制造电缆及导电体、铝合金、铝箔、铝粉及铝制器皿
A 199.0	99	0.50	0.45	0.90	0.02	—	1.0	制造铝合金及其它合金、铝食具、电缆及导电体、中间合金
A 198.0	98	1.10	1.00	1.80	0.05	—	2.0	用作铝合金配料、中间合金、铝制器具及日用品

①　单位为ppm，系百万分率符号。

表3.1.5-2　　纯铝冶炼产品的典型机械性能(参考数据)

状态	抗拉强度	屈服强度	剪切强度	伸长率	断面收缩率	硬度
	(MPa)			δ_{10}(%)	ψ(%)	HB
铸态	90～120	30～40	70～80	18～25	40～55	25～30

表 3.1.5-3　　　　　　　　纯铝冶炼产品的物理性能(参考数据)

性能 / 类别	相对密度 (20℃时)	熔点 (℃)	弹性模数 E (MPa)	导热系数 20℃时(J/cm·s·℃)	20℃时电阻率 (Ω·mm²/m)	导电率 (为铜的导电率%)	20℃时电阻温度系数 (10^{-3}/℃)	0～100℃线胀系数 α (10^{-6}/℃)
高纯铝 (99.996%)	2.6989	660.2	69992	2.38	2.6548×10^{-2}	64.94	4.29	23.86
工业纯铝 (99.0%)	2.71	643～660	80871		2.9×10^{-2}			

1.2　铝合金

铝合金是以铝为基，添加其它元素(铜、镁、硅、锌等)组成的合金，具有密度小、比强度高、塑性好、抗大气腐蚀等优良性能，在航海和轮机制造等方面得到了广泛的应用。

根据成分、性能和加工工艺特点不同，铝合金可分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。根据热处理强化的可能性，铝合金又可分为可热处理强化的和不可热处理强化的两类。

1)变形铝合金　与铸造铝合金相比，其特点是：合金元素的含量低，组织中的化合物量少，加热到给定温度后可成为单相固溶体组织，故变形铝合金具有高的塑性，可经受各类压力加工，加工成棒、板、条和各类型材。

变形铝合金按其热处理性能特点可分为：不能热处理强化的铝合金——防锈铝和热处理可以强化的铝合金——硬铝、超硬铝和锻铝。

(1)防锈铝　它包括铝锰和铝镁系合金，其抗蚀性能优良，故名防锈铝。它不能热处理强化，强度较低，但略高于纯铝。为了提高其强度，常采用冷变形加工，这时，它的塑性和抗蚀性却下降。防锈铝的切削性差，故常用作管道、容器、焊接结构、铆钉以及其它冷变形零件。

(2)硬铝　属于铝铜镁系合金，可以热处理强化，淬火并时效后有高的强度，在退火与淬火后有良好的塑性，可加工成板，棒、管、线等型材及锻件。硬铝的强度随合金中铜镁含量的增加而增加，但塑性降低。硬铝的焊接性能较好，抗蚀性差。在表面包一层纯铝，可提高其抗蚀性。

(3)超硬铝　属铝镁铜锌系合金，是室温强度最高的铝合金。但工艺性较差，缺口敏感性较大，更主要的是抗蚀性差。为了提高其抗蚀性，通常在材料表面上包有含锌1.0%的铝层。超硬铝主要用于受力较大的结构和零件。

(4)锻铝　有Al-Mg-Si、Al-Mg-Si-Cu、Al-Cu-Mg-Si-Fe-Ni系合金。

Al-Mg-Si系合金热处理强化效果差，强度低，但塑性和抗蚀性高，易于锻造。相反，添加铜的Al-Mg-Si-Cu合金有好的热处理强化效果，强度高，且随含铜量的增加而增高，但塑性和抗蚀性下降。Al-Cu-Mg-Si-Fe-Ni系合金的主要成分和硬度与Al-Mg-Si-Cu系合金相似，但添加有铁镍。其性能特点是有高的高温强度，能在200～300℃，甚至350℃以下工作，故又称为耐热铝合金，广泛用于制造内燃机活塞、压缩机叶轮等重要零件。

各类变形铝合金的代号、成分、机械性能和热处理见表3.1.5-4，表3.1.5-5。

表 3.1.5-4　**铝及铝合金加工产品的分组、代号及化学成分**(摘自GB 3190—82)

序号	组别	代号	主要化学成分(%) Cu	Mg	Mn	Fe	Si	其它	Al
(1)	工业高纯铝	LG 5							99.99
(2)		LG 4							99.97
(3)		LG 3							99.93
(4)		LG 2							99.90
(5)		LG 1							99.85
(6)	工业纯铝	L 1							99.7
(7)		L 2							99.6
(8)		L 3							99.5
(9)		L 4							99.3
(10)		L 4-1				0.15~0.30	0.10~0.20		99.3
(11)		L 5							99.0
(12)		L 5-1	0.05~0.20						99.0
(13)		L 6							98.8
(14)	包覆铝	LB 1						Zn 0.9~1.3	余量
(15)		LB 2							99.5
(16)	防锈铝	LF 2		2.0~2.8	或Cr 0.15~0.40				余量
(17)		LF 3		3.2~3.8	0.30~0.60		0.50~0.80		余量
(18)		LF 4		4.0~4.9	0.40~1.0			Cr 0.05~0.25	余量
(19)		LF 5		4.8~5.5	0.30~0.60				余量
(20)		LF 5-1		4.5~5.6	0.05~0.20			Cr 0.05~0.20	余量
(21)		LF 6		5.8~6.8	0.50~0.80		Ti 0.02~0.10	Be 0.0001~0.005	余量
(22)		LF 10		4.7~5.7	0.20~0.60				余量
(23)		LF 11		4.8~5.5	0.30~0.60		Ti或V 0.02~0.15		余量
(24)		LF 12		8.3~9.6	0.40~0.80		Ti 0.05~0.15	Sb 0.004~0.05	余量
(25)		LF 13		9.2~10.5	0.40~0.80		Ti 0.05~0.15	Sb 0.004~0.005	余量
(26)		LF 14		5.8~6.8	0.50~0.80		Ti 0.10~0.30	Be 0.0001~0.005	余量
(27)		LF 33		6.0~7.5	Zn 0.5~1.5	Zr 0.10~0.30	Ti 0.05~0.15	Be 0.0005~0.005	余量
(28)		LF 43		0.6~1.4	0.15~0.40				余量
(29)		LF 21			1.0~1.6				余量
(30)	硬铝	LY 1	2.2~3.0	0.20~0.50					余量
(31)		LY 2	2.6~3.2	2.0~2.4	0.45~0.70				余量
(32)		LY 4	3.2~3.7	2.1~2.6	0.50~0.80		Ti 0.05~0.40	Be 0.001~0.01	余量
(33)		LY 6	3.8~4.3	1.7~2.3	0.50~1.0		Ti 0.03~0.15	Be 0.001~0.005	余量
(34)	硬铝	LY 8	3.8~4.5	0.4~0.8	0.40~0.80				余量
(35)		LY 9	3.8~4.5	1.2~1.6	0.30~0.70				余量
(36)		LY 10	3.9~4.5	0.15~0.30	0.30~0.50				余量
(37)		LY 11	3.8~4.8	0.40~0.80	0.40~0.80				余量
(38)		LY 12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.30~0.90				余量
(39)		LY 13	4.0~5.0	0.30~0.50					余量
(40)		LY 16	6.0~7.0		0.40~0.80		Ti 0.10~0.2		余量
(41)		LY 17	6.0~7.0	0.25~0.45	0.40~0.80		Ti 0.10~0.2		余量

续上表

序号	组别	代号	主要化学成分（%）						
			Cu	Mg	Mn	Fe	Si	其　它	Al
(42)	锻铝	LD 2	0.20～0.60	0.45～0.90	或Cr 0.15～0.35		0.50～1.2		余量
(43)		LD 2-1	0.10～0.40	0.40～0.80	0.10～0.30		0.75～1.15	Ti 0.01～0.04	余量
(44)		LD 2-2	0.15～0.40	0.50～1.2	0.40～1.0		1.0～1.7		余量
(45)		LD 5	1.8～2.6	0.40～0.80	0.40～0.80		0.7～1.2		余量
(46)		LD 6	1.8～2.6	0.40～0.80	0.40～0.80	Ti 0.02～0.1	0.70～1.2	Cr 0.01～0.2	余量
(47)		LD 7	1.9～2.5	1.4～1.8		0.90～1.5	Ti 0.02～0.1	Ni 0.9～1.5	余量
(48)		LD 8	1.9～2.5	1.4～1.8		1.0～1.6	0.5～1.2	Ni 0.9～1.5	余量
(49)		LD 9	3.5～4.5	0.40～0.80		0.5～1.0	0.5～1.0	Ni 1.8～2.3	余量
(50)		LD 10	3.9～4.8	0.40～0.80	0.40～1.0		0.6～1.2		余量
(51)		LD 11	0.5～1.3	0.80～1.3			11.5～13.5	Ni 0.5～1.3	余量
(52)		LD 30	0.15～0.4	0.80～1.2			0.40～0.80	Cr 0.04～0.35	余量
(53)		LD 31		0.45～0.90			0.20～0.60		余量
(54)	超硬铝	LC 3	1.8～2.4	1.2～1.6	Zn 6.0～6.7		Ti 0.02～0.08		余量
(55)		LC 4	1.4～2.0	1.8～2.8	0.20～0.60	Zn 5.0～5.7		Cr 0.10～0.25	余量
(56)		LC 9	1.2～2.0	2.0～3.0		Zn 5.1～6.1		Cr 0.16～0.30	余量
(57)		LC 10	0.5～1.0	3.0～4.0	0.20～0.35	Zn 3.2～4.2		Cr 0.10～0.20	余量
(58)		LC 12		0.5～1.0		Zn 5.0～6.5		Zr 0.05～0.25	余量
(59)	特殊铝	LT 1					4.5～6.0		余量
(60)		LT 13					6.8～8.2		余量
(61)		LT 17					11～12.5		余量
(62)		LT 41		6.0～7.0	0.30～0.60			Ti 0.02～0.10	余量
(63)		LT 62							99.95
(64)		LT 66		1.5～2.0					余量
(65)		LT 75						Ce 0.004～0.01	99.93
(66)	钎焊铝	LQ 1	心板LF 21	包覆层LT 17					
(67)		LQ 2	心板LF 21	包覆层LT 13					

表 3.1.5-5　　**常用铝及铝合金加工产品的机械性能**

代　号	半成品种类	材料状态	尺　寸 (mm)		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%) ≥	标准号
L 1、L 2、L 3、L 4、L 5、L 5-1、L 6	冷轧板材	M	厚度	0.3～0.5	≤108	—	20	GB 3880-83
			厚度	0.6～0.9	≤108	—	25	
			厚度	1～10	≤108	—	28	
		Y_2	厚度	0.3～0.4	98	—	3	
				0.5～0.7	98		4	
				0.8～1.0	98	—	5	
				1.2～4.0	98	—	6	
		Y	厚度	0.3～0.9	137	—	2	
				1.0～4.0	137	—	3	
				5.0～6.0	128	—	4	

代　号	半成品种类	材料状态	尺　寸 (mm)		抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	伸长率δ (%) ≥	标准号
					(MPa)			
L 1、L 2、L 3、L 4	热轧板材	R	厚度	5~10	68.7	—	15	GB 3193—82
				11~25	78.5	—	18	
				26~80	63.7	—	10	
L 5、L 6			厚度	5~10	68.7	—	18	
				11~25	78.5	—	18	
				26~30	63.7	—	15	
L 1 ~L 6	挤压棒材	M或R	所有尺寸		≤108	—	25	GB 3191—82
L 4	铆钉线材	Y	直径	1.6~10	τ 58.8	—	—	GB 3196—82
L 4、L 6	拉制薄壁管材	M	所有尺寸		≤118	—	20	YB 1702—77
		Y	外径	壁厚				
			所有尺寸	≤2.0 2.5~ 5	108 98	—	4 5	
L 1 ~L 6	挤制厚壁管材	R	所有尺寸		≤118	—	20	GB 4437—84
LF 2	冷轧板材	M	厚度	0.3~1.0 1.2~10.0	167~226 167~226	— —	16 18	GB 3880—83
		Y_2		0.3~1.0 1.2~6.0	235 235	— —	4 6	
		Y		0.3~1.0 1.2~4.0	265 265	—	—	3 4
	热轧板材	R	厚度	5 ~25 26~80	177 157	— —	7 6	GB 3193—82
	挤压棒材	M或R	所有尺寸		≤226	—	10	GB 3191—82
	铆钉线材	Y	直径	1.6~10	τ 118	—	—	GB 3196-82
	拉制薄壁管材	M	所有尺寸		≤226	—	—	YB 1702—77
		Y	外径	壁厚				
			≤55	≤2.5 其它尺寸	226 196	— —	— —	
	挤制厚壁管材	R	所有尺寸		≤226			GB 4437—84
LF 10	铆钉线材	Y	直径	1.6~10	τ 157②	—	—	GB 3196—82
LF 12	挤用棒材	M、R	直径	≤150	373	186	15③	GB 3191—82
LF 21	冷轧板材	M	厚度	0.3~0.7 0.8~3.0 3.5~10.0	98~147 98~147 98~147	— — —	18 22 20	GB 3880—83
		Y_2		0.5~6.5	147~216	—	6	
		Y		0.3~0.5 0.6~0.8 0.9~1.2 1.5~6.0	186 186 186 186	— — — —	1 2 3 4	

续上表

代　号	半成品种类	材料状态	尺寸 (mm)		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率δ (%) ≥	标准号
	热轧板材	R	厚度	5~10	108	—	15	GB 3193—82
				11~25	118	—	15	
				26~50	108	—	12	
	挤压棒材	M、R	所有尺寸		≤167		20③	GB 3191—82
	铆钉线材	Y	直径	1.6~10	τ 68.7	—	—	GB 3196—82
	拉制薄壁管材	M Y	所有尺寸		<137 137	—	—	YB 1702—77
	挤制厚壁管材	R	所有尺寸		≤167	—	—	GB 4437—84
LY 8	铆钉线材	CZ	直径	1.6~10	τ 235	—	—	GB 3196—82
LY 9		CZ	直径	1.6~10	τ 265	—	—	
LY 10		CS	直径	1.6~8.0 >8.0	τ 245 τ 235	—	—	
LY 11	冷轧板材（包铝）	M	厚度	0.5~2.5	≤226	—	12	GB 3880—83
				2.6~10	≤235	—	12	
		CZ		0.5~2.5	363	186	15	
				2.6~10	373	196	15	
	热轧板材	CZ	厚度	5~10	353	186	12	GB 3193—82
				11~25	373	216	11	
				26~40	333	196	8	
				41~70	314	196	6	
				71~80	284	196	4	
				35~80	高向 294	—	4	
	挤压棒材	CZ	直径	<160	373	216	12③	GB 3191—82
			直径	>160	353	196	10③	
	高强度挤压棒材	CZ	直径	20~160	392	245	8③	GB 3191—82
		R	直径	20~160	392	245	8③	
	拉制薄壁管材		外径	壁厚				YB 1702—77
		M	所有尺寸		≤245	—	10	
		CZ	<22	≤1	373	196	3	
				1.5~2	373	196	14	
			22~50	≤1	392	226	12	
				1.5~5	392	226	13	
			>50	≤5	392	226	11	
	挤制厚壁管材	M	所有尺寸		≤245	—	10	GB 4437—84
		CZ	≤120	—	353	196	12	
			>120		373	216	10	

续上表

代　号	半成品种类	材料状态	尺　寸 (mm)		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率δ (%) ≥	标准号
LY 12	冷轧板材（包铝）	M	厚度	0.5～4	≤216	—	14	GB 3880—83
				5～10	≤235	—	12	
		CZ		0.5～2.5	407	270	13	
				3～6.0	427	275	11	
				7～10	427	275	10	
		CZY		1.5～2.5	427	333	10	
				3～6	456	343	8	
	冷轧板材	BM		0.5～3.0	≤235	—	12	YB 1701—77
				3.5～10	≤235	—	11	
		BCZ		0.5～1.5	441	289	14	
				1.8～6.0	441	289	13	
				7～10	441	289	12	
		BCZY		1.5～3.0	476	358	10	
				3.5～6.0	476	358	9	
		JM		0.5～4.0	≤226	—	10	
		JCZ		0.5～4.0	363	231	13	
	热轧板材	CZ	厚度	5～10	412	255	10	GB 3193—82
				11～25	422	275	7	
				26～40	392	255	5	
				41～70	373	245	4	
				71～80	343	245	3	
				35～80	高向 343	—	3	
	挤压棒材	CZ	直径	≤22	392	255	12③	GB 3191—82
				23～160	422	275	10③	
				>160	412	255	8③	
	高强度挤压棒材	R CZ		20～160	441	304	8③	GB 3192—82
				20～120	441	304	8③	
	挤制厚壁管材		外径	壁厚				GB 4437—84
		M	所有尺寸		≤245	—	10	
		CZ	≤120		392	255	12	
			>120		422	275	10	
	拉制薄壁管材		外径	壁厚				YB 1702—77
		M	所有尺寸		≤245	—	10	
		CZ	<22	≤2.0	412	255	15	
			22～50	≤5.0	422	275	12	
			>50	≤5.0	422	275	10	
LY 13	挤压棒材	CZ	直径	≤22	314	—	4③	GB 3191—82
				>23～160	343	—	4③	
				>160	—	—		

续上表

代号	半成品种类	材料状态	尺寸 (mm)		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%) ≥	标准号
LY 16	冷轧板材	M	厚度	所有尺寸	≤235	—	15	YB 607—66
		CZ		所有尺寸	275	—	12	
		CS		所有尺寸	373	275	8	
	热轧板材	CS	厚度	11~80	373	275	8	GB 3193—82
		CZ			275	—	12	
	挤压棒材	CS	直径	所有尺寸	353	235	8③	GB 3191—82
LD 2	冷轧板材	M	厚度	0.3~5.0	≤147	—	20	GB 3880—83
				6~10	≤147	—	15	
LD 2	冷轧板材	CZ	厚度	0.3~0.6	196	—	18	GB 3880—83
				0.7~3.0	196	—	20	
				3.5~5.0	196	—	18	
				6~10	177	—	16	
		CS		0.5~5.0	294	—	10	
				6~10	294	—	8	
	热轧板材	CZ	厚度	5~25	177	—	14	GB 3193—82
				26~40	167	—	12	
				41~80	167	—	10	
		CS		5~25	294	—	7	
				26~40	284	—	6	
				41~80	275	—	6	
	挤压棒材	CS	直径,	所有尺寸	294	—	12③	GB 3191—82
LD 5	挤压棒材	CS	直径,	所有尺寸	353	—	12③	GB 3191—82
	高强度挤压棒材	R	直径	20~160	383	—	10③	GB 3192—82
		CS	直径	20~120	383	—	10③	
LD 7、LD 8	挤压棒材	CS	直径,	所有尺寸	353	—	8③	GB 3191—82
LD 9					353	—	10③	
LD 10	挤压棒材	CS	直径	≤22	441	—	10③	
			直径	23~160	451	—	10③	
			直径	>160	432	—	8③	
	高强度挤压棒材	R	直径	20~160	461	—	8③	GB 3192—82
		CS	直径	20~120	461	—	8③	
	热轧板材	CS	厚度	5~40	432	343	5	GB 3193—82
LC 3	铆钉线材	CS	直径	1.6~10	τ 284	—	—	GB 3196—82
LC 4、LC 9	挤压棒材	CS	直径	≤22	490	373	7③	GB 3191—82
			直径	23~160	530	402	6③	
			直径	>160	510	402	5③	
	高强度挤压棒材	R	直径	20~100	549	451	6③	GB 3192—82
			直径	101~160	530	432	6③	
		CS	直径	20~120	549	451	6③	

续上表

代号	半成品种类	材料状态	尺寸 (mm)		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%) ≥	标准号
LC 4、LC 9	冷轧板材	M	厚度	0.5～10	≤245	--	10	GB 3880—83
		CS		0.5～2.5	481	402	7	
				2.8～10	490	412	7	
		CSY		1.2～10	520	451	6	
	热轧板材	CS	厚度	5～10	490	412	6	GB 3193—82
				11～25	490	412	4	
				26～40	490	412	3	
				35～40	高向 392	—	2	

① 状态符号表示意义：M-退火，CZ—淬火(自然时效)，CS—淬火(人工时效)，Y—硬，Y_2—半硬，R—热轧或热挤，B—不包铝，J-加厚包铝的

② τ为剪切强度。

③ δ_5(%)。

2）铸造铝合金　铸造铝合金除应具备一定的使用性能外，还应具有良好的铸造性。一般具有共晶成分的合金有最佳的铸造性能，但往往会在组织中出现大量硬脆相(化合物)，使合金的脆性增大。因此，实际使用的铸造铝合金多数是含有部分共晶体。此外，铸造铝合金含有较多的合金元素，塑性低，难以变形，常用于铸造零件。

根据基本合金元素的不同，铸造铝合金有以下 4 大类：

(1)铝硅系铸造铝合金　又称硅铝明，是目前应用最广泛的铸造铝合金。它有优良的铸造性能，可制造大的或形状复杂的薄壁铸件；抗蚀性好；密度小；机械性能较好等。

这类合金可分为普通硅铝明和特殊硅铝明。前者是铝硅二元合金，不能热处理强化，强度较低。但其铸态性能可借“变质处理”加以改善。一般用于铸造负荷不大、形状复杂、耐冲击、耐腐蚀的零件。特殊硅铝明是在铝硅二元合金的基础上添加铜镁等元素所组成，可以热处理强化，因而，不但有较好的抗蚀性，耐热性和良好的铸造性，而且还有相当高的强度，是制造铝活塞的主要材料。

(2)铝铜系铸造铝合金　主要优点是：强度和耐热性较高，但密度较大，抗蚀性较差，铸造性能不好。目前，大部分已被其它铝合金所取代。

(3)铝镁系铸造铝合金　其优点是：机械性能高，强度是铸造铝合金中最高的；耐蚀性好，含镁量为 7％～8％时，其抗蚀性可与纯铝相媲美；相对密度小(2.55)，是铝合金中最轻的。因此，它用于制造腐蚀条件下工作、受力较大的铸件，如氨用泵体、泵盖、海船配件等。但由于铸造性能差，熔铸工艺复杂和热强性低，使其应用范围远小于硅铝明。

(4)铝锌系铸造铝合金　它有较高的强度，是最便宜的铸造铝合金。主要缺点是抗蚀性能差。添加较多的硅和少量的镁、铬、钛等元素可以改善它的机械性能、铸造性能和抗蚀性能等。

铸造铝合金的代号、化学成分、机械性能、热处理工艺规范及应用举例见表 3.1.5-6、表 3.1.5-7、表 3.1.5-8、表 3.1.5-9。

表 3.1.5-6　　　　　　　　　**常用铝及铝合金加工产品的特性和用途**

组别	代　号	主　要　特　性	用　途　举　例
工业纯铝	L2、L3 L4、L6	有高的可塑性、耐蚀性、导电性和导热性，但强度低、热处理不能强化，切削加工性不好；可气焊、氢原子焊和接触焊，不易钎焊，易承受各种压力加工和引伸、弯曲	用于不承受载荷但要求具有某种特性，如高塑性、高的耐蚀或导电、导热性的结构元件，如垫片、电容器、电子管隔离罩、电缆电线线芯等
防锈铝	LF 21	是应用最广的一种防锈铝。它的强度不高，不能热处理强化，在退火状态下有高的塑性，耐蚀性好，焊接性良好，切削加工性不良	要求高的可塑性和良好的焊接性、在液体或气体介质中工作的低载荷零件，如油箱、油管、液体容器
	LF 2 LF 3	强度比LF 21 较高，塑性与耐蚀性高，热处理不能强化，焊接性好（LF 3 的焊接性优于LF 2），在冷作硬化状态下的切削性较好，可抛光	在液体下工作的中等强度的焊接件、冷冲压的零件和容器、骨架零件等
	LF 6	有较高的强度和耐蚀性，退火和挤压状态下塑性尚好，用氩弧焊的焊缝气密性和焊缝塑性尚可，气焊和点焊的焊接接头强度为基体强度的 90%～95%，切削加工性良好	用于焊接容器、受力零件、飞机蒙皮及骨架零件
硬铝	LY 1	为铆接铝合金结构用的主要铆钉材料。在淬火和自然时效后的强度较低，但有很高的塑性和良好的工艺性能，焊接性与LY 11 相同，切削性能尚可，耐蚀性不高	广泛用作中等强度和工作温度≤100℃的结构用铆钉材料。铆钉在淬火和时效后进行铆接，在铆接中不受热处理后时间限制
	LY 2	为耐热硬铝，且有较高的强度，热变形时塑性高，可热处理强化，在淬火及人工时效状态下使用。切削加工性良好，耐蚀性比LD 7、LD 8 耐热锻铝较好	工作温度为 200～300℃的涡轮喷气发动机轴向压缩机叶片及其它在较高温度下工作的承力结构件
	LY 4 LY 8 LY 9	均为铆钉用合金，其中LY 4 有较好的耐热性，可在 125～250℃内使用，LY 9 的强度较高；但其共同缺点是铆钉必须在淬火后一定时间内铆接，故工艺困难，应用范围受到限制	主要用作铆钉材料
	LY 10	铆钉用合金，有较高的剪切强度，铆接过程不受热处理时间的限制，这是它优于其它铆钉合金之处，但耐蚀性不高	代替LY 1、LY 8、LY 9 等用于制造要求较高强度的铆钉，工作温度不宜超过 100℃
	LY 11	是应用最早的一种标准硬铝，有中等强度，可热处理强化，在淬火和自然时效状态下使用，点焊性能良好，气焊及氩弧焊时有裂纹倾向，热态下可塑性尚好，切削加工性在淬火时效状态下尚好，耐蚀性不高	用作各种要求中等强度的零件和构件，冲压的连接部件、空气螺旋桨叶片、局部镦粗的零件（如螺栓、铆钉）
	LY 12	高强度硬铝，可热处理强化，在退火和刚淬火状态下塑性中等，点焊性能好，气焊和氩弧焊时有裂纹倾向，抗蚀性不高，切削加工性在淬火和冷作硬化后尚好、退火后低	各种要求高负荷的零件和构件（但不包括冲压件和锻件）如骨架零件、铆钉等 150℃以下工作的零件
	LY 16	耐热硬铝，常温下强度不高而在高温下却有较高的蠕变强度；热态下塑性较高，可热处理强化，点焊、滚焊及氩弧焊焊接性能良好，抗蚀性不高，切削加工性尚好	用作 250～350℃下工作的零件，如轴向压缩机叶片、圆盘；板材用作常温或高温下工作的焊接件，如容器、气密仓舱等
锻铝	LD 2	中等强度，在热态和退火状态下可塑性高，易于锻造、冲压。在淬火和自然时效状态下具有LF 21 一样好的耐蚀性，易于点焊和氢原子焊，气焊尚可，切削加工性在淬火时效后尚可	用于要求高塑性和高耐蚀性、中等载荷的零件以及形状复杂的锻件和模锻件，如气冷式发动机曲轴箱、桨叶
锻铝	LD 5	高强度锻铝，热态下有高的可塑性，易于锻造、冲压，可热处理强化；工艺性能较好，抗蚀性也较好，但有晶间腐蚀倾向；切削加工性和点焊、滚焊、接触焊性能良好，电焊、气焊性能不好	形状复杂和中等强度的锻件和冲压件
	LD 7 LD 8	耐热锻铝，可热处理强化，点焊、滚焊和接触焊性能良好，电焊、气焊性能差，耐蚀性和切削加工性尚好；LD 7 的热强性和可塑性均较LD 8 稍高	内燃机活塞、压气机叶片、叶轮、圆盘以及其它在高温下工作的复杂锻件

续上表

组别	代号	主要特性	用途举例
	LD 10	高强度锻铝，热强性也较好，但在热态下的可塑性稍差；其它性能和LD 5相同	高负荷和形状简单的锻件和模锻件
超硬铝	LC 3	超硬铝铆钉合金，可热处理强化，剪切强度较高，耐蚀性和切削加工性尚可，铆钉时不受热处理时间的限制	受力结构的铆钉。当工作温度≤125℃时可作为LY 10铆钉合金的代用品
	LC 4 LC 9	高强度铝合金，在退火和刚淬火状态下的可塑性中等，可热处理强化，通常在淬火、人工时效状态下使用，此时得到的强度比一般硬铝高的多，但塑性较低；有应力集中倾向，点焊性能良好，气焊不良；热处理后的切削加工性良好，退火状态稍差，LC 9板材的静疲劳、缺口敏感、应力腐蚀性能稍优于LC 4	承力构件和高载荷零件，通常多用以取代LY 12

表 3.1.5-7　**铸造铝合金的代号和化学成分**（摘自GB 1173—74）

组别	合金代号	主要化学成分（%）					
		Si	Cu	Mg	Mn	其它	Al
铝硅合金	ZL 101	6.0~8.0		0.2~0.4			其余
	ZL 102	10.0~13.0					其余
	ZL 103	4.5~6.0	1.5~3.0	0.3~0.7	0.3~0.7		其余
	ZL 104	8.0~10.5		0.17~0.3	0.2~0.5		其余
	ZL 105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.35~0.6			其余
	ZL 106	7.0~8.5	1.0~2.0	0.2~0.6	0.2~0.6		其余
	ZL 107	6.5~7.5	3.5~4.5				其余
	ZL 108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0	0.3~0.9		其余
	ZL 109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.5		Ni 0.5~1.5	其余
	ZL 110	4.0~6.0	5.0~8.0	0.2~0.5			其余
	ZL 111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.4~0.6	0.1~0.35	Ti 0.1~0.35	其余
铝铜合金	ZL 201		4.5~5.3		0.6~1.0	Ti 0.15~0.35	其余
	ZL 202		9.0~11.0				其余
	ZL 203		4.0~5.0				其余
铝镁合金	ZL 301			9.5~11.5			其余
	ZL 302	0.8~1.3		4.5~5.5	0.1~0.4		其余
铝锌合金	ZL 401	6.0~8.0		0.1~0.3	钛 0.1~0.4	Zn 9~13	其余
	ZL 402	铬 0.3~0.8		0.3~0.8		Zn 5~7	其余

3.1.5-8　**铸造铝合金的机械性能**（摘自GB 1173—74）

序号	合金代号	铸造方法	热处理状态	机械性能(不低于)		
				抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	硬度 HB
1	ZL 101	S, J	—	157	2	50
		S, J	T 2	137	2	45
		J	T 4	186	4	50
		S	T 4	177	4	50
		J	T 5	206	2	60
		S	T 5	196	2	60
		SB	T 6	226	1	70
		SB	T 7	196	2	60
		SB	T 8	157	3	55

续上表

序号	合金代号	铸造方法	热处理状态	机械性能(不低于) 抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	硬度 HB
2	ZL 102	SB, JB	—	147	4	50
		SB, JB	T 2	137	4	50
		J	—	157	2	50
		J	T 2	147	3	50
3	ZL 103	S	—	137	0.5	65
		J	—	167	0.5	65
		S, J	T 1	167	—	70
		S, J	T 2	147	1	65
		S	T 5	216	0.5	75
		J	T 5	245	0.5	75
		S, J	T 7	206	1	70
4	ZL 104	S,J S, J	T 8 —	177 147	2 2	65 50
		J	T 1	196	1.5	70
		SB	T 6	226	2	70
		J	T 6	235	2	70
5	ZL 105	S, J	T 1	157	0.5	65
		S	T 5	196	1	70
		J	T 5	235	0.5	70
		S	T 6	226	0.5	70
		J	T 7	177	1	65
6	ZL 106	SB	—	177	1	75
		SB	T 0	245	1	90
7	ZL 107	SB	—	167	2	65
		SB	T 6	245	2.5	90
		J	—	196	2.5	70
		J	T 6	275	3	100
8	ZL 108	J	T 1	196	—	85
		J	T 6	255	—	90
9	ZL 109	J	T1	196	0.5	90
		J	T 6	245	—	100
10	ZL 110	S	—	128	—	80
		J	—	157	—	80
		S	T 1	147	—	80
		J	T 1	167	—	90

续上表

序 号	合金代号	铸造方法	热处理状态	机 械 性 能(不低于)		
				抗拉强度 σ_b MPa	伸长率 (δ_5) (%)	硬 度 HB
11	ZL 111	J	—	206	2	80
		J	T 6	314	2	100
12	ZL 201	S	T 4	294	8	70
		S	T 5	402	4	90
13	ZL 202	S、J	—	108	—	50
		S、J	T 6	167	—	100
14	ZL 203	S	T 4	196	6	60
		J	T 4	206	6	60
		S	T 5	216	3	70
		J	T 5	226	3	70
15	ZL 301	S	T 4	275	9	60
16	ZL 302	S、J	—	147	1	55
17	ZL 401	S	T 1	196	2	80
		J	T 1	245	1.5	90
18	ZL 402	J	T 1	235	4	70
		S	T 1	216	4	65

注：①表中符号说明：J—金属型铸造；B—变质处理；S—砂型铸造。

②热处理状态代号：T 1—人工时效；T 2—退火；T 4—粹火；T 5—淬火和部分时效；T 6—淬火和完全时效；T 7—淬火和稳定回火；T 8—淬火和软化回火。

③ZL 401、ZL 402 的性能系经过自然时效 20 天或人工时效后的性能。

表 3.1.5-9　　铸造铝合金的热处理工艺规范和应用举例

合金代号	热处理代号	淬 火 工 艺			时效或退火工艺			用途举例
		加热温度 (℃)	保温时间 (h)	冷却介质 (水) 温度(℃)	加热温度 (℃)	保温时间 (h)	冷却方式	
ZL 101	T 1	—	—	—	230± 5	7 ~ 9	空冷	改善被切削加工性能
	T 4	535± 5	2 ~ 6	60~100	—	—	—	要求高塑性的零件
	T 5	535± 5	2 ~ 6	60~100	155± 5	2 ~ 7	空冷	要求提高屈服强度和硬度的零件
	T 6	535± 5	2 ~ 6	60~100	255± 5	7 ~ 9	空冷	要求高强度和高硬度零件
	T 7	535± 5	2 ~ 6	60~100	250± 5	2 ~ 4	空冷	
ZL 102	T 2	—	—	—	290±10	2 ~ 4	空冷	轻载荷的零件
ZL 103	T 1	—	—	—	180± 5	3 ~ 5	空冷	轻载荷的零件
	T 2	—	—	—	290±10	2 ~ 4	空冷	要求尺寸稳定并消除应力的零件
	T 5	515± 5	3 ~ 6	60~100	175± 5	3 ~ 5	空冷	在低于 175℃ 下工作的重载荷零件
	T 7	515± 5	3 ~ 6	60~100	230± 5	3 ~ 5	空冷	在 175~250℃ 工作的零件
	T 8	510± 5	5 ~ 6	60~100	230± 5	3	空冷	要求有塑性的零件

续上表

合金代号	热处理代号	淬火工艺			时效或退火工艺			用途举例
		加热温度(℃)	保温时间(h)	冷却介质(水)温度(℃)	加热温度(℃)	保温时间(h)	冷却方式	
ZL 104	T 1 T 6	— 535± 5	— 2 ~ 6	— 60~100	175± 5 175± 5	5 ~15 10~15	空冷 空冷	受中等载荷的零件，受重载荷的零件
ZL 105	T 1	—	—	—	180± 5	5 ~10	空冷	受中等载荷的零件
	T 5	525± 5	3 ~ 5	100	160± 5	3 ~ 5	空冷	受中等载荷的零件
	T 6	525± 5	3 ~ 5	60~100	180± 5	5 ~10	空冷	受重载荷的零件件
	T 7	525± 5	3 ~ 5	60~100	240±10	3 ~ 5	空冷	在较高温度下工作的零件，如气缸头
ZL 107	T 6	515± 5	10	60~100	155± 5	10	空冷	—
ZL 108	T 1	—	—	—	200±10	10~14	空冷	—
	T 6	515± 5	3 ~ 8	60~80	205± 5	6 ~10	空冷	重载荷高温下工作的零件，如大马力柴油机活塞
ZL 109	T 6	500± 5	5	80	185± 5	16	空冷	高温、高速、大马力活塞
ZL 110	T 1	—	—	—	210±10	10~16	空冷	高温下工作的活塞及其他零件
ZL 201	T 4	分级加热 535± 5 545± 5	7 ~ 9 7 ~ 9	60~100	—	—	—	要求高塑性的铸件
	T 5	分级加热 535± 5 535± 5	7 ~ 9 7 ~ 9	60~100	175± 5	3 ~ 5	空冷	要求高屈服极限的零件
ZL 202	T 2	—	—	—	290±10	3	空冷	消除应力稳定尺寸的零件
	T 6	510± 5	12	80~100	155± 5 (S) 175± 5 (J)	10~14 7 ~14	空冷	要求高强度高硬度的零件
	T 7	510± 5	3 ~ 5	80~100	200~250	3	空冷	高温下工作的零件，如活塞
ZL 203	T 4	515± 5	10~15	60~100	—	—	—	要求高强度高塑性的零件
	T 5	515± 5	10~15	60~100	150± 5	2 ~4	空冷	要求高屈服极限高硬度的零件
ZL 301	T 4	435± 5	8 ~20	80~100 或 60℃油	—	—	—	要求耐蚀和承受冲击载荷的零件
ZL 302	T 1	—	—	—	170± 5	4 ~ 6	空冷	—
ZL 401	T 2	—	—	—	290± 5	3	空冷	消除应力稳定尺寸的零件
ZL 402	T 1	—	—	—	180± 5 或室温	10 21 天	空冷	—

3）铝合金的强化和热处理　金属的强化方法有很多种，应用于铝和铝合金强化的主要是冷变形强化，固溶强化，细晶强化和弥散强化等等。

（1）冷变形强化　纯铝的强度低，可利用冷变形提高其强度。不能利用热处理强化的合金，如防锈铝，添加镁和锰以后，产生固溶强化或第二相强化作用，但其强度仍然是不高的，可利用冷变形使其强度进一步提高。一般来说，金属经冷变形后，强度虽然提高了，但塑性和韧性却有所降低。

近代理论认为，金属冷变形实为金属晶体内部大量位错运动的结果。晶界、第二相硬质点、位错之间缠结都会对位错运动产生阻力。随着变形程度加大，位错密度升高，位错之间产生缠结，形成所谓形变胞状亚结构。微观组织的这些变化，使位错运动的阻力增大，金属变形变得愈来愈困难，即发生强度升高，塑性、韧性下降。

（2）细晶强化　晶界是阻碍位错运动的障碍物。晶界两侧晶粒位向不同，晶界上富集杂质，并有大量位错等缺陷，这些都阻碍位错运动。因此，晶粒越细，单位体积内晶界面积越大，金属强度越高。晶粒细化还可以改善塑性和韧性，是提高金属强韧性的途径之一。

细化晶粒的方法有：控制热加工（塑性变形和再结晶）工艺、凝固过程和热处理等。如铸造铝合金，尤其是铝硅合金的性能（强度和韧性）通过变质处理可得到明显改善。变质处理的实质就是借助变质剂和铝硅合金液的相互作用，使合金组织细化，尤其是使脆性相——硅的晶粒细化，并使共晶点移动，共晶合金转变为具有亚共晶组织的合金。

（3）弥散强化　由材料基体中弥散分布的第二相质点产生的强化称为弥散强化。强化的原因是：运动位错与第二相质点的交互作用，提高了运动位错的阻力。

铝合金的弥散强化是通过淬火-时效来实现的。淬火-时效是重要的热处理工艺方法之一。

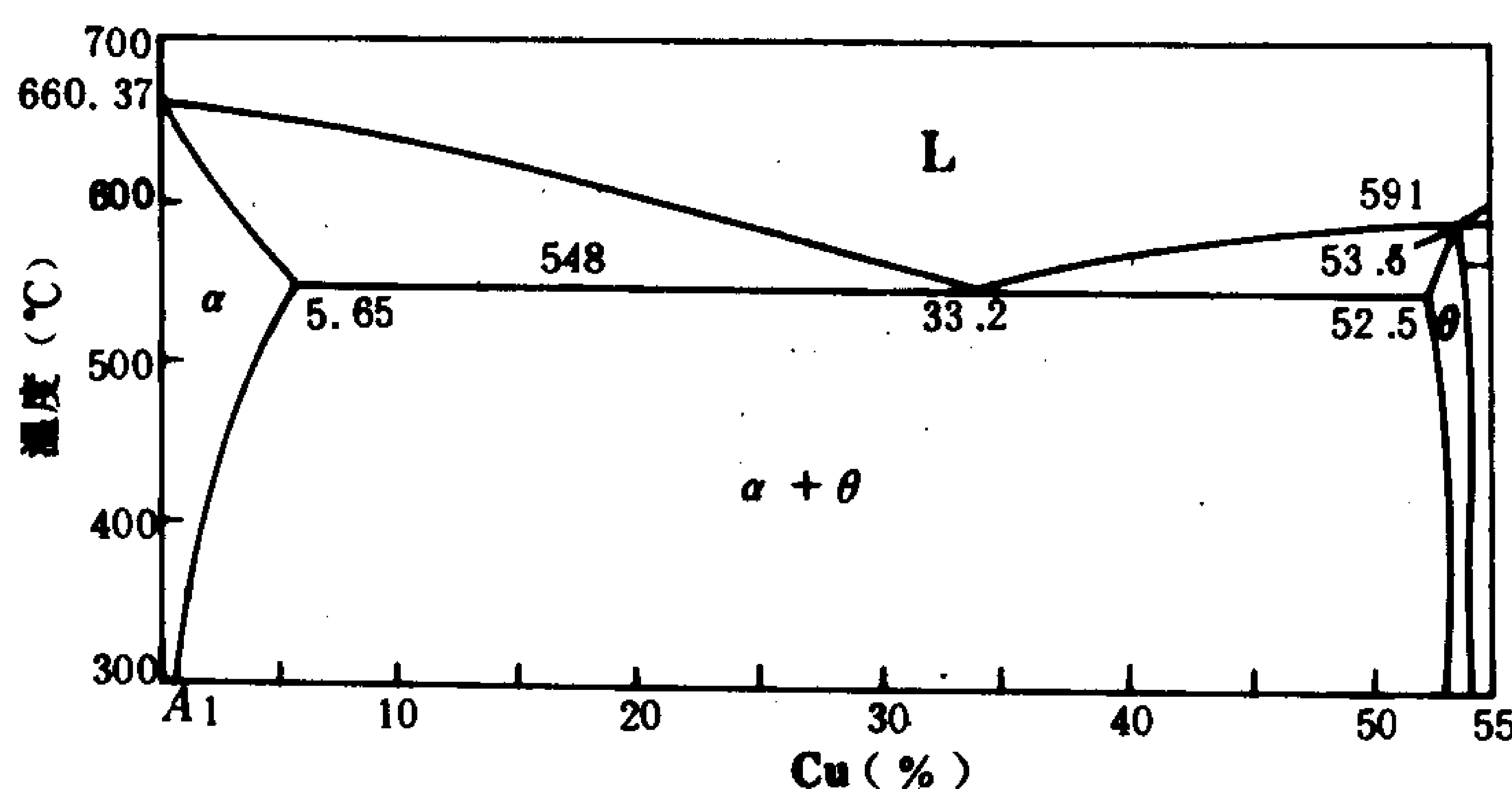


图 3.1.5-1　铝铜二元相图

①淬火　在退火状态下，铝合金的组织通常由铝基固溶体和化合物（强化相）两部分组成，且化合物在铝中的溶解度随温度降低而减小，如图 3.1.5-1 中 I 号合金便是这样。淬火的目的是借助加热使化合物全部（变形铝合金）或部分（铸造铝合金）地溶于铝基固溶体，其后通过快速冷却而得到过饱和固溶体。这种处理方法常称为固溶处理。

②时效　淬火后所得到的固溶体是一种不稳定的组织，有析出化合物而转变为稳定组织的倾向。淬火铝合金在室温或低温加热时析出细小、弥散且与母相保持共格或不共格关系的化合物，而使铝合金强度增高的现象分别称为自然时效和人工时效。

含铜 4％的铝-铜合金时效后的强度与时效温度和时间的关系如图 3.1.5-2 所示。

（4）再结晶退火　金属在冷变形强化的同时伴有塑性的降低，这种现象称为加工硬化或冷作硬化。在金属材料生产中，为满足不同的需要，提供退火、半硬化和硬化状态的半成品（型材）。

金属塑性变形的程度越大，其塑性越低，以致不能继续变形，否则会断裂。如需继续冷

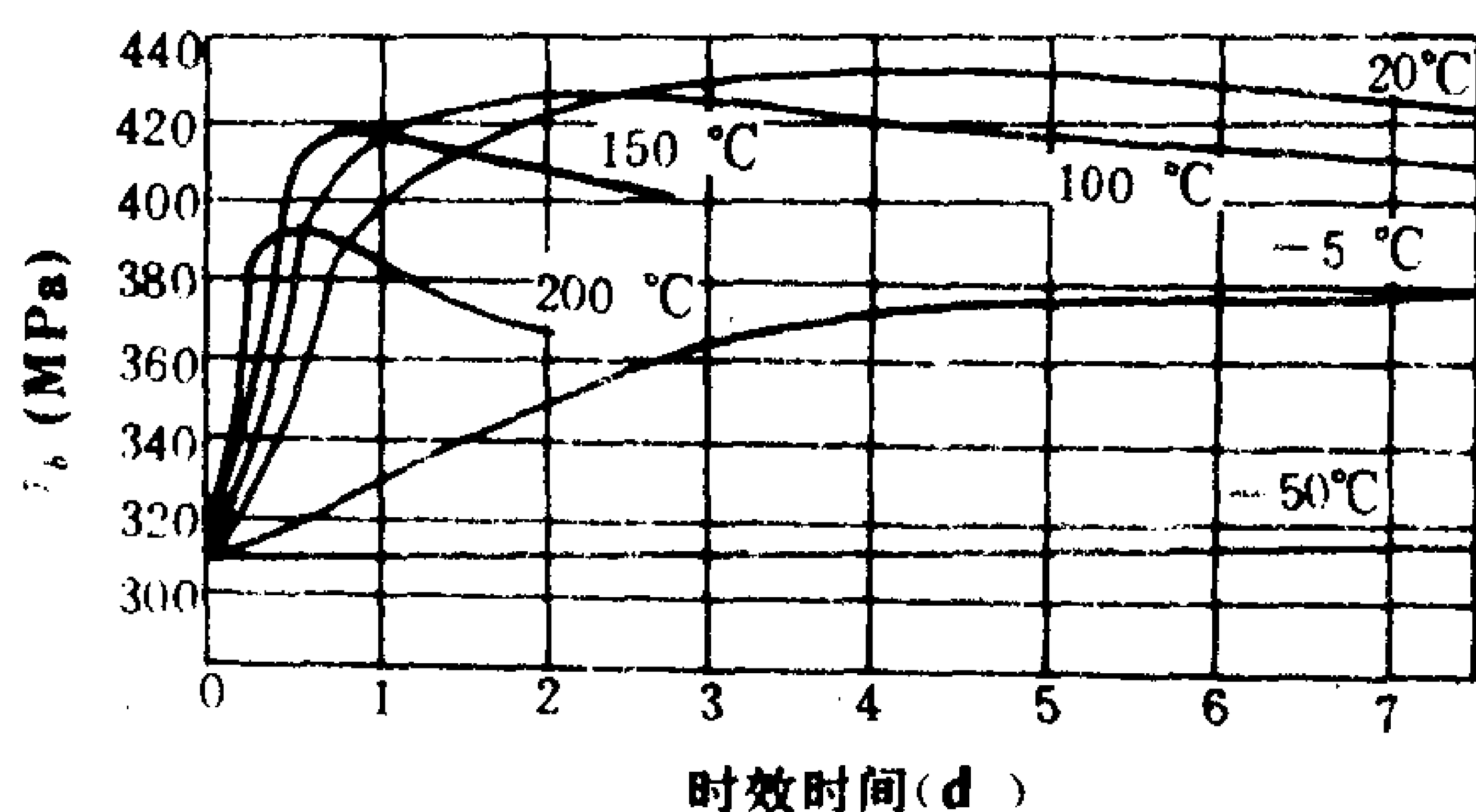


图 3.1.5-2　含铜为 4%的铝-铜合金在不同温度下的时效曲线

变形，则必须对冷变形金属进行再结晶退火。

再结晶退火的工艺特点是将冷变形金属加热到再结晶温度以上 200℃左右，保温一段时间后冷却。

在保温阶段，冷变形金属的显微组织发生明显变化，即冷变形后"破碎"的、被拉长的晶粒全部转变为均匀而细小的等轴状晶粒，位错密度明显降低，因而金属强度下降，塑性提高，即加工硬化全部消失，金属的各项性能均恢复到冷变形以前的水平。

2　铜和铜合金的应用和热处理

按化学成分的不同，铜合金可分为黄铜、青铜及白铜 3 大类。根据加工工艺和用途不同，又可将铜合金分为变形铜合金和铸造铜合金两类。

2.1　纯铜

纯铜又名紫铜，熔点为 1083℃，相对密度为 8.9。纯铜是一种逆磁性物质，常被用来制造不允许受外磁场干扰的仪器，如罗盘、航海仪器等。纯铜的导电性和导热性很好，其导电性仅次于银，广泛用作电工导体。在大气中，铜能在表面生成绿色保护膜，表现出良好的耐蚀性，在淡水和蒸汽中的抗蚀性也很好，在海水中的腐蚀速度不大，但在氢氧化铵和氯化铵中抗蚀性很差。铜有极好的塑性，能经受各种形式的冷热压力加工。值得注意的是，在 400℃左右，铜的塑性剧烈下降，一般认为这与铜中杂质铅的存在有关。铜的热压力加工通常于 800～900℃进行。冷变形对铜的导电性影响不大，但使铜产生加工硬化，是提高铜及铜合金强度的常用方法，很多铜材都是在冷作硬化状态下使用。

氧对铜的机械性能和工艺性能都有不良影响。氧使铜产生冷脆。同时，含氧过多的铜在含氢的还原性气氛中退火时，出现脆裂现象，通常称为"氢病"。根据含氧量和其它杂质量的不同，铜可分为工业纯铜（氧含量较高）和无氧铜两大类，其化学成分及杂质含量见表 3.1.5-10、表 3.1.5-11。机械性能见表 3.1.5-12、表 3.1.5-13。

表 3.1.5-10　　纯铜冶炼产品的牌号、化学成分及用途（摘自GB 466—82）

代号	化学成分(%)		用途
	Cu不小于	杂质总和不大于	
Cu-1	99.95	0.05	适用于电解铜，供熔铸铜线锭、铜棒、铜锭（块）和铸造合金用
Cu-2	99.90	0.1	适用于电工用铜线锭，供压延导电线材、铜棒和型材用

代号	杂质含量(%)不大于										
	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	P
Cu-1	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.004	—	0.003	0.001
Cu-2	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	—	0.002	0.004	0.005	0.004	—

表 3.1.5-11　　加工铜的组别、牌号、代号及主要化学成分（摘自GB 5231—85）

组别	牌号	代号	主要化学成分(%)(重量)			杂质总和%(重量)
			Cu+Ag	P	Ag	
纯铜	一号铜	T 1	≥99.95	—	—	≤0.05
	二号铜	T 2	≥99.90	—	—	≤0.1
	三号铜	T 3	≥99.70	—	—	≤0.3
无氧铜	一号无氧铜	TU 1	≥99.97	—	—	≤0.03
	二号无氧铜	TU 2	≥99.95	—	—	≤0.05
磷脱氧铜	一号脱氧铜	TP 1	≥99.90	0.005～0.012	—	≤0.1
	二号脱氧铜	TP 2	≥99.85	0.013～0.050	—	≤0.15
银铜	0.1 银铜	TAg 0.1	Cu≥99.5	—	0.06～0.12	≤0.3

表 3.1.5-12　　纯铜加工产品的机械性能

代号	半成品种类	尺寸(mm)	材料状态	抗拉强度 σ_b≥ (MPa)	伸长率 δ_{10} (%)≥	δ_5 (%)≥	标准号
T 2、T 3、(T 4)	拉制铜棒	直径 5～40	硬(Y)①	275	5	10	GB 4423—84
		>40～60		245	8	12	
		>60～80		206	13	19	
		直径 5～80	软(M)	196	38	45	
	挤制铜棒	直径 30～120	热挤(R)	186	30	40	
T 2、T 3、(T 4)(TUP)	冷轧板条	厚度 0.2～10	软(M)	196	30②	—	GB 2040—80
			硬(Y)	294	3②	—	
	热轧板条	厚度 4～50	热轧(R)	196	30②	—	
	冷轧铜带	厚度 0.05～1.5	软(M)	206	30②	—	GB 2059—80
			硬(Y)	294	3②	—	
T 2、T 3、(T 4)、TU 1、TU 2、(TUP)	拉制铜管	外径 3～360	硬(T)	294	—	—	GB 1257—79
			软(M)	206	35	42	
	挤制铜管	外径 30～300	热挤(R)	186	35	42	GB 1258—79
T 2、T 3	铆钉用铜线	直径 1.0～6.0	拉制	235	15③	—	GB 3117—82

① 括号内的代号，按GB 5231—85《加工铜》的规定，已经废除。

② δ为$L_0=11.3\sqrt{F_0}$。

③ δ为$L_0=100$ mm。

表 3.1.5-13　　紫铜板(条)的牌号及机械性能

类别	牌号	制造方法和材料状态		抗拉强度σ_b (MPa)	伸长率δ(%) ($l_0=11.3\sqrt{F_0}$)
				不小于	
紫铜板、条	T 2、T 3	冷轧	软	196	30
			硬	295	3
	T 4、TUP	热轧		196	30

2.2 黄铜

铜和锌的合金称黄铜。铜锌二元合金称为普通黄铜。

1)普通黄铜

普通黄铜的含锌量多在38%以下，随着含锌量的增加，铸态下的抗拉强度极限增大。当含锌量为30%时，有最好的塑性，能很好地经受冷热加工成型，广泛用于轮机制造中。

冷变形是提高黄铜强度的一种重要方法。值得注意的是，含锌量较高的黄铜经冷变形后放置几天就会自行裂开。“自裂”实际上是一种应力腐蚀开裂，因此，黄铜制品必须进行去应力退火。普通黄铜在大气和淡水中有良好的抗蚀性，在海水中腐蚀速度略有增加。

2)特殊黄铜

为了改善普通黄铜的性质，向其中加入少量锡、铅、锰、铁、硅、镍、铝等元素，就成为特殊黄铜，如锡黄铜、铅黄铜等。

锡能提高黄铜的强度，并能显著提高抗海水腐蚀的能力，故锡黄铜有海军黄铜之称。铅能改善黄铜的切削加工性，铅黄铜被称为“易削黄铜”。少量铝能在铜合金表面形成坚固的氧化膜，能提高黄铜对气体、溶液，特别是对高速流动海水的耐蚀性，并能提高黄铜的强度和硬度。但铝使黄铜铸造组织粗化，加铝同时，再加微量铁，则粗化程度可减轻。锰能提高黄铜的强度、硬度和在海水及过热蒸汽中的抗蚀性。含铝或铁的锰黄铜是使用历史最久的船用螺旋桨材料之一，但由于腐蚀破裂倾向较大，使其在一些重要的螺旋桨上的使用受到了限制。镍能提高黄铜的冲击韧性和抗拉强度，提高抗蚀性。少量硅能提高黄铜的强度和硬度，但当硅量过多会降低合金塑性，此外，硅还能提高黄铜的抗蚀性。

黄铜加工产品牌号、化学成分见表3.1.5-14。

黄铜加工产品的机械性能见表3.1.5-15。

表3.1.5-14　　**加工黄铜的组别、代号及其主要化学成分**（摘自GB 5232—85)

组别	代号	主要化学成分(%)			杂质总和(%)
		Cu	Zn	其它合金元素	
普通黄铜	H 96	95.0~97.0	余量		≤0.2
	H 90	88.0~91.0	余量		≤0.2
	H 85	84.0~86.0	余量		≤0.3
	H 80	79.0~81.0	余量		≤0.3
	H 70	68.5~71.5	余量		≤0.3
	H 68	67.0~70.0	余量		≤0.3
	H 65	63.5~68.0	余量		≤0.3
	H 63	62.0~65.0	余量		≤0.5
	H 62	60.5~63.5	余量		≤0.5
	H 59	57.0~60.0	余量		≤1.0
镍黄铜	HNi 65-5	64.0~67.0	余量	Ni 5.0~6.5	≤0.3
	HNi 56-3	54.0~58.0	余量	Ni 2.0~3.0, Al 0.3~0.5, Fe 0.15~0.5	≤0.6

续上表

组别	代号	主要化学成分(%)			杂质总和(%)
		Cu	Zn	其它合金元素	
铅黄铜	HPb 63-3	62.0~65.0	余量	Pb 2.4~3.0	≦0.75
	HPb 63-0.1	61.5~63.5	余量	Pb 0.05~0.3	≦0.5
	HPb 62~0.8	60.0~63.0	余量	Pb 0.5~1.2	≦0.75
	HPb 61-1	59.0~61.0	余量	Pb 0.6~1.0	≦0.75
	HPb 59-1	57.0~60.0	余量	Pb 0.8~1.9	≦1.0
加砷黄铜	HAl 77-2	76.0~79.0	余量	Al 1.8~2.3, As 0.03~0.06	≦0.3
	HSn 70-1	69.0~71.0	余量	Sn 0.8~1.3, As 0.03~0.06	≦0.3
	H 68 A	67.0~70.0	余量	As 0.03~0.06	≦0.3
锡黄铜	HSn 90-1	88.0~91.0	余量	Sn 0.25~0.75	≦0.2
	HSn 62-1	61.0~63.0	余量	Sn 0.7~1.1	≦0.3
	HSn 60-1	59.0~61.0	余量	Sn 1.0~1.5	≦1.0
铝黄铜	HAl 67-2.5	66.0~68.0	余量	Al 2.0~3.0	≦1.5
	HAl 60-1-1	58.0~61.0	余量	Al 0.7~1.5, Mn 0.1~0.6, Fe 0.7~1.5	≦0.7
	HAl 59-3-2	57.0~60.0	余量	Al 2.5~3.5, Ni 2.0~3.0	≦0.9
	HAl 66-6-3-2	64.0~68.0	余量	Al 6.0~7.0, Fe 2.0~4.0, Mn 1.5~2.5	≦1.5
铁黄铜	HFe 59-1-1	57.0~60.0	余量	Fe 0.6~1.2, Al 0.1~0.5, Mn 0.5~0.8, Sn 0.3~0.7	≦0.3
	HFe 58-1-1	56.0~58.0	余量	Fe 0.7~1.3, Pb 0.7~1.3	≦0.5
锰黄铜	HMn 58-2	57.0~60.0	余量	Rn 1.0~2.0	≦1.2
	HMn 57-3-1	55.0~58.5	余量	Mn 2.5~3.5, Al 0.5~1.5	≦1.3
	HMn 55-3-1	53.0~58.0	余量	Mn 3.0~4.0, Fe 0.5~1.5	≦1.5
硅黄铜	HSi 80-3	79.0~81.0	余量	Si 2.5~4.0	≦1.5

表 3.1.5-15　**常用加工黄铜产品的机械性能**

合金代号	半成品种类	尺寸(mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geqq$ (MPa)	伸长率 δ_{10} (%) ≧	伸长率 δ_5 (%) ≧	标准号
H 96	冷轧板材	厚度 0.2~10	软 (M)	216	33	—	GB 2041—80
			硬 (Y)	324	3	—	
	冷轧带材	厚度 0.05~1.5	软 (M)	216	30	—	GB 2060—80
			硬 (Y)	324	3	—	
	拉制管材	外径 3~200	半硬 (Y_2)	294	—	—	GB 1529—79
			软 (M)	206	35	42	
	挤制管材	外径 21~280	热挤 (R)	186	35	42	GB 1530—79
	拉制棒材	直径 5~40	硬 (Y)	265	4	—	GB 4424—84
		>40~60		245	6	—	
		>60~80		206	11	—	
		直径 5~80	软 (M)	196	35	—	
	挤制棒材	直径 16~80	挤制(R)	196	30	—	

续上表

合金代号	半成品种类	尺寸(mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率		标 准 号
					δ_{10}	δ_5	
					(%) $\geq$		
H 80	冷轧板材	厚度 0.2～10	软 (M)	265	50	—	GB 2041—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.5	硬 (Y)	实测	实测	—	GB 2060—80
H 68	冷轧板材	厚度 0.2～10	软 (M)	294	40	—	GB 2041—80
			半硬 (Y_2)	343	25	—	
			硬 (Y)	392	13	—	
	冷轧带材	厚度 0.05～1.5	软 (M)	294	40	—	GB 2060—80
			半硬 (Y_2)	343	25	—	
			硬 (Y)	392	13	—	
			特硬 (T)	490	4	—	
	拉制管材	外径 3～200	软 (M)	294	38	43	GB 1529—79
			半硬 (Y_2)	343	30	34	
	拉制棒材	直径 5～12	硬 (Y)	373	15	18	GB 4424—84
		＞12～40		314	25	33	
		＞40～80		294	30	—	
		直径 13～35	软 (M)	294	45	—	
	挤制棒材	直径 16～80	热挤 (R)	294	40	45	
	拉制线材	直径 0.05～0.25	软 (M)	373	18①	—	GB 3110—82
			半硬 (Y_2)	412	—	—	
			3/4 硬 (Y_1)	539～736	—	—	
			硬 (Y)	736～932	—	—	
		直径＞0.25～1.0	软 (M)	353	25①	—	
			半硬 (Y_2)	392	5①	—	
			3/4 硬 (Y_1)	490～687	—	—	
			硬 (Y)	687～883	—	—	
H 68	拉制线材	直径＞1.0～2.0	软 (M)	333	30①	—	GB 3110—82
			半硬 (Y_2)	373	10①	—	
			3/4 硬 (Y_1)	441～637	—	—	
			硬 (Y)	637～834	—	—	
		直径＞2.0～4.0	软 (M)	314	35①	—	
			半硬 (Y_2)	353	12①	—	
			3/4 硬 (Y_1)	392～588	—	—	
			硬 (Y)	588～785	—	—	
		直径＞4.0～6.0	软 (M)	294	40①	—	
			半硬 (Y_2)	343	14①	—	
			3/4 硬 (Y_1)	343～539	—	—	
			硬 (Y)	539～736	—	—	
H 62	拉制管材	外径 3～200	软 (M)	294	38	43	GB 1529—79
			半硬 (Y_2)	333	30	34	
	挤制管材	外径 21～280	热挤 (R)	294	38	43	GB 1530—79
	冷轧板材	厚度 0.2～10	软 (M)	294	40	—	GB 2041—80
			半硬 (Y_2)	343	20	—	
			硬 (Y)	412	10	—	
			特硬 (T)	588	25	—	

续上表

合金代号	半成品种类	尺寸(mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 δ_{10} (%) ≥	伸长率 δ_5 (%) ≥	标准号
H 62	热轧板材	厚度 5～50	热轧 (R)	294	30	—	GB 2041—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.5	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y) 特硬 (T)	294 373 412 588	35 20 10 2.5	— — — —	GB 2060—80
	拉制棒材	直径 5～40 >40～80	硬 (Y)	373 333	15 20	17 23	GB 4424—84
	挤制棒材	直径 10～160	热挤 (R)	294	30	35	
	铆钉线材	直径 1.0～6.0	拉制	373	18①	—	GB 3117—82
	拉制线材	直径 0.05～0.25	软 (M) 半硬 (Y_2) 3/4硬(Y_1) 硬 (Y)	343 432 588～785 736～932	18① — — —	— — — —	GB 3110—82
		直径>0.25～1.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 3/4硬(Y_1) 硬 (Y)	333 412 539～736 687-883	22① 4 ① — —	— — — —	
	拉制线材	直径>1.0～2.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 3/4硬(Y_1) 硬 (Y)	324 392 490～687 637～834	26① 7 ① — —	— — — —	GB 3110—82
		直径>2.0～4.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 3/4硬(Y_1) 硬 (Y)	314 373 432～637 588～785	30① 10① — —	— — — —	
		直径>4.0～6.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 3/4硬(Y_1) 硬 (Y)	314 353 392～588 539～736	34① 12① — —	— — — —	
H 59	冷轧板材	厚度 0.2～10	软 (M) 硬 (Y)	294 412	25 5	— —	GB 2041—80
	热轧板材	厚度 5～50	热轧 (R)	294	25	—	
	冷轧带材	厚度 0.05～1.5	软 (M) 硬 (Y)	294 412	10 5	— —	GB 2060—80
HPb 63-3	拉制棒材	直径 5～9.5 >9.5～14 >14～20 >20～30	硬 (Y)	510 490 451 412	2 5 8 10	2.5 6 9 12	GB 4425—84
		直径 10～20 >20～60	半硬 (Y_2)	353 324	12 16	14 19	
	拉制线材	直径 0.5～2.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	304 392～608 569～736	32① 3 ① —	— — —	GB 3112—82

续上表

合金代号	半成品种类	尺寸(mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 δ_{10} (%) ≥	伸长率 δ_5 (%) ≥	标准号
		直径>2.0~4.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	294 392~598 569~736	35① 4① —	— — —	
		直径>4.0~6.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	284 392~588 569~736	35① 4① —	— — —	
HPb 59-1	冷轧板材	厚度 0.2~10	软 (M) 半硬 (Y_2)	343 392	25 12	— —	GB 2041—80
	冷轧带材	厚度 0.05~1.5	硬 (Y)	441	5	—	GB 2060—80
	热轧板材	厚度 5~50	热轧 (R)	373	18	—	GB 2041—80
	挤制管材	外径 21~280	热挤 (R)	392	20	24	GB 1530—79
	拉制棒材	直径 5~20 >20~40 >40~80	拉制	422 392 373	10 12 16	12 14 19	GB 4425—84
	挤制棒材	直径>10~160	热挤 (R)	363	18	21	
	拉制线材	直径 0.5~2.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	343 392~588 490~736	25① — —	— — —	GB 3112—82
		直径>2.0~4.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	333 392~588 490~687	28① — —	— — —	
		直径>4.0~6.0	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	324 373~569 441~637	30① — —	— — —	
HSn 70-1	拉制管材	外径 3~200	软 (M) 半硬 (Y_2)	294 343	38 30	43 34	GB 1529—79
HSn 62-1	冷轧板材	厚度 0.2~10	软 (M) 硬 (Y)	294 392	35 5	— —	GB 2041—80
	热轧板材	厚度 5~50	热挤 (R)	343	20	—	
	冷轧带材	厚度 0.05~1.5	硬 (Y)	392	5	—	GB 2060—80
	拉制管材	外径 3~200	半硬 (Y_2) 软 (M)	333 294	30 35	— —	GB 1529~79
	拉制棒材	直径 5~40 >40~60	硬 (Y)	392 363	15 20	17 23	GB 4426—84
	挤制棒材	直径 10~120	热挤 (R)	363	20	22	
HAl 60-1-1	热轧板材 挤制棒材	厚度 4~40 直径 10~120	热轧 (R) 热挤 (R)	441 441	15 18	— —	GB 2042—80 GB 4426—84

续上表

合金代号	半成品种类	尺寸(mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率		标 准 号
					δ_{10}	δ_5	
					(%) ≥		
HMn 58-2	拉制棒材	直径 5～12 >12～40 >40～60	硬 (Y)	441 412 392	20 20 25	24 24 —	GB 4426—84
	挤制棒材	直径 10～120	热挤 (R)	392	25	29	
	冷轧板材	厚度 0.2～10	软 (M) 半硬 (Y_2)	383 441	30 25	— —	GB 2041—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.5	硬 (Y)	588	3	—	GB 2060—80
HFe 59-1-1	挤制管材	外径	热挤 (R)	432	28	31	GB 1330—79
	拉制棒材	直径 5～12 >12～40 >40～60	(R) (Y)	490 441 412	15 17 20	17 19 22	GB 4426—84
	挤制棒材	直径 10～120	热挤 (R)	432	28	31	

① δ (l_0=100 mm)，%。

黄铜加工产品的主要特性和用途见表 3.1.5-16。

铸造黄铜的牌号、化学成分和机械性能见表 3.1.5-17。

铸造黄铜的主要特性和用途见表 3.1.5-18。

表 3.1.5-16　**黄铜加工产品的主要特性和用途举例**

组别	牌 号	主 要 特 性	用 途 举 例
普通黄铜	H 96	强度比紫铜高(但在普通黄铜中，它是最低的)，导热、导电性好，在大气和淡水中有高的耐蚀性，且有良好的塑性，易于冷、热压力加工，易于焊接、锻造和镀锡，无应力腐蚀破裂倾向	在一般机械制造中用作导管、冷凝管、散热器管、散热片以及导电零件等
	H 90	性能和H 96相似，但强度较H 96稍高，可镀金属及涂敷珐琅	供水及排水管、水箱带以及双金属片
	H 85	具有较高的强度，塑性好，能很好地承受冷、热压力加工，焊接和耐蚀性能也都良好	冷凝和散热用管、虹吸管、蛇形管、冷却设备制件
	H 80	性能和H 85近似，但强度较高，塑性也较好，在大气、淡水及海水中有较高的耐蚀性	造纸网、薄壁管、皱纹管
	H 75	有相当好的机械性能、工艺性能和耐蚀性，能很好地在热态和冷态下压力加工，在性能和经济性上居于H 80、H 70之间	低载荷耐蚀弹簧
	H 70 R 68	有极为良好的塑性(是黄铜中最佳者)和较高的强度，切削加工性能好，易焊接，对一般腐蚀非常安定，但易产生腐蚀开裂。H 68是普通黄铜中应用最为广泛的一个品种	复杂的冷冲件和深冲件，如散热器外壳、导管、波纹管、垫片等
	H 65	性能介于H 68和H 62之间，价格比H 68便宜，也有较高的强度和塑性，能良好地承受冷、热压力加工，有腐蚀破裂倾向	小弹簧、螺钉、铆钉和机器零件
	H 62	有良好的机械性能，热态下塑性良好，冷态下塑性也可以，切削性好，易钎焊和焊接，耐蚀，但易产生腐蚀破裂，此外价格便宜，是应用广泛的一个普通黄铜品种	各种深引伸和弯折制造的受力零件，如销钉、铆钉、垫圈、螺帽、导管、气压表弹簧、筛网、散热器零件等

续上表

组别	牌　　号	主　要　特　性	用　途　举　例
	H 59	价格最便宜，强度、硬度高而塑性差，但在热态下仍能很好地承受压力加工，耐蚀性一般，其它性能和H 62相近	一般机器零件、焊接件、热冲及热轧零件
铅黄铜	HPb 74-3	含铅高的铅黄铜，一般不进行热加工，因有热脆倾向。有好的切削性	拖拉机零件以及一般机器零件
	HPb 60-1	有好的切削加工性和较高的强度，其它性能同HPb 59-1	结构零件
	HPb 59-1 HPb 59-1 A	应用较广的铅黄铜，它的特点是切削性好，有良好的机械性能，能承受冷、热压力加工，易钎焊和焊接，对一般腐蚀有良好的稳定性，但有腐蚀破裂倾向，HPb 59-1 A杂质含量较高，用于比较次要的制件	适于以热冲压和切削加工制作的各种结构零件，如螺钉、垫圈、垫片、衬套、螺母、喷嘴等
锡黄铜	HSn 90-1	机械性能和工艺性能极近似于H 90普通黄铜，但有高的耐蚀性和减摩性，目前只有这种锡黄铜可作为耐磨合金使用	弹性套管及其它耐蚀减摩零件
	HSn 70-1	典型的锡黄铜，在大气、蒸汽、油类和海水中有高的耐蚀性，且有良好的机械性能，切削性尚可，易焊接和钎焊，在冷、热状态下压力加工性好，有腐蚀破裂（季裂）倾向	海船上的耐蚀零件(如冷凝气管)，与海水、蒸汽、油类接触的导管，热工设备零件
	HSn 62-1	在海水中有高的耐蚀性，有良好的机械性能，冷加工时有冷脆性，只适于热压加工，切削性好，易焊接和钎焊，但有腐蚀破裂（季裂）倾向	用作与海水或汽油接触的船舶零件或其它零件
	HSn 60-1	性能与HSn 62-1相似，主要产品为线材	船舶焊接结构用的焊条
铝黄铜	HAl 77-2	典型的铝黄铜，有高的强度和硬度，塑性良好，可在热态及冷态下进行压力加工，对海水及盐水有良好的耐蚀性，并耐冲击腐蚀，但有脱锌及腐蚀破裂倾向	船舶冷凝管以及其它耐蚀零件
	HAl 77-2 A HAl 77-2 B	性能、成分与H 177-2相似，因加入了少量的砷、锑，提高了对海水的耐蚀性，又因加入少量的铍，机械性能也有所改进	
	HAl 70-1.5	性能与HAl 77-2接近，但加入了少量的砷，提高了对海水的耐蚀性，腐蚀破裂倾向减轻，并能防止黄铜在淡水中脱锌	船舶冷凝管以及其它耐蚀零件
	HAl 67-2.5	在冷态热态下能良好的承受压力加工，耐磨性好，对海水的耐蚀性尚可，对腐蚀破裂敏感，钎焊和镀锡性能不好	海船抗蚀零件
	HAl 60-1-1	具有高的强度，在大气、淡水和海水中耐蚀性好，但对腐蚀破裂敏感，在热态下压力加工性好，冷态下可塑性低	要求耐蚀的结构零件，如齿轮、蜗轮、衬套、轴等
	HAl 59-3-2	具有高的强度，耐蚀性是所有黄铜中最好的，腐蚀破裂倾向不大，冷态下塑性低，热态下压力加工性好	发动机和船舶中其它在常温下工作的高强度耐蚀件
	HAl 66-6-3-2	为耐磨合金，具有高的强度、硬度和耐磨性，耐蚀性也较好，但有腐蚀破裂倾向，塑性较差。为铸造黄铜的移植品种	重负荷下工作中固定螺钉的螺母及大型蜗杆；可作铝青铜QAl 10-4-4的代用品

续上表

组别	牌号	主要特性	用途举例
锰黄铜	HMn 58-2	在海水和过热蒸汽、氯化物中有高的耐蚀性，但有腐蚀破裂倾向；机械性能良好，导热导电性低，易于在热态下进行压力加工，冷态下压力加工性尚可，是应用较广的黄铜品种	腐蚀条件下工作的重要零件和弱电流工业用零件
	HMn 57-3-1	强度、硬度高，塑性低，只能在热态下进行压力加工；在大气、海水、过热蒸汽中的耐蚀性比一般黄铜好，但有腐蚀破裂倾向	耐腐蚀结构零件
	HMn 55-3-1	性能和HMn 57-3-1接近，为铸造黄铜的移植品种	耐腐蚀结构零件
铁黄铜	HFe 59-1-1	具有高的强度、韧性，减摩性能良好，在大气、海水中的耐蚀性高，但有腐蚀破裂倾向，热态下塑性良好	制作在摩擦和受海水腐蚀条件下工作的结构零件
	HFe 58-1-1	强度、硬度高，切削性好，但塑性下降，只能在热态下压力加工，耐蚀性尚好，有腐蚀破裂倾向	适于用热压和切削加工法制作的高强度耐蚀零件
硅黄铜	HSi 80-3	有良好的机械性能，耐蚀性高，无腐蚀破裂倾向，耐磨性亦可，在冷态、热态下压力加工性好，易焊接和钎焊，切削性好，导热导电性是黄铜中最低的	船舶零件、蒸汽管和水管配件
	HSi 65-1.5-3	强度高，耐蚀性好，在冷态和热态下能很好地进行压力加工，易于焊接和钎焊，有很好的耐磨性和切削性，但有腐蚀破裂倾向	耐磨锡青铜的代用品,用于腐蚀和摩擦条件下工作的高强度零件
镍黄铜	HNi 65-5	有高的耐蚀性和减摩性，良好的机械性能，在冷态和热态下压力加工性能极好，对脱锌和“季裂”比较稳定,导热导电性低,但因镍的价格较贵,故HNi 65-5一般用的不多	压力表管、造纸网、船舶用冷凝管等，可作锡磷青铜和德银的代用品

表 3.1.5-17　**铸造黄铜分组、代号、化学成分和机械性能（摘自GB 1176—74）**

序号	合金牌号	合金代号	主要化学成分（%）								铸造方法	机械性能（不低于）		
			Cu	Si	Pb	Al	Fe	Mn	Sn	Zn		抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	硬度 HB
	（1）普通黄铜													
1	62 黄铜	ZH 62	60.0～63.0							其余	S J	300 300	30 30	60 70
	（2）硅黄铜													
2	80-3-3 硅黄铜	ZHSi 80-3-3	79.0～81.0	2.5～4.5	2.0～4.0					其余	S J	250 300	7 15	85 95
3	80-3 硅黄铜	ZHSi 80-3	79.0～81.0	2.5～4.5						其余	S J	300 350	15 20	90 100
	（3）铅黄铜													
4	48-3-2-1 铅黄铜	ZHPb 48-3-2-1	46.0～50.0		2.5～4.0		0.3～1.0	1.5～2.5		其余	S J	400 450	10 10	100 120
5	59-1 铅黄铜	ZHPb 59-1	57.0～61.0		0.8～1.9					其余	S J	200 250	10 20	80 90
	（4）铝黄铜													
6	66-6-3-2 铝黄铜	ZHAl 66-6-3-2	64.0～68.0			5.0～7.0	2.0～4.0	1.5～2.5		其余	S J	600 650	7 7	160 160
7	67-2.5 铝黄铜	ZHAl 67-2.5	66.0～68.0			2.0～3.0				其余	S J	300 400	12 15	80 90
	（5）铁黄铜													
8	59-1-1 铁黄铜	ZHFe 59-1-1	57.0～60.0			0.1～0.4	0.6～1.2	0.5～0.8	0.3～0.7	其余	S J	300 350	25 25	85 90
	（6）锰黄铜													
9	55-3-1 锰黄铜	ZHMn 55-3-1	53.0～58.0				0.5～1.5	3.0～4.0		其余	S J	450 500	15 10	100 110
10	58-2-2 锰黄铜	ZHMn 58-2-2	57.0～60.0		1.5～2.5			1.5～2.5		其余	S J	250 350	10 18	70 80
11	58-2 锰黄铜	ZHMn 58-2	57.0～60.0					1.0～2.0		其余	S J	350 400	20 25	80 90

注：①合金代号中“Z”、“H”为“铸”、“黄”二字汉语拼音第一个字母，化学元素符号为主要添加元素，并以此分组，其后数字为该合金的成分数字组。
②铸造方法代号：S——砂型铸造；J——金属型铸造。

表 3.1.5-18　　　　　　　　铸造黄铜的主要特性和用途举例

合金代号	主　要　特　性	用　途　举　例
ZH 62	有良好的机械性能，塑性高，是铸造黄铜中最好的；铸造性能好，切削性中等，在海水中有一定的耐蚀性，但易产生腐蚀破裂，焊接性能好，价格便宜。	一般耐蚀零件，如管路配件以及要求抗冲击腐蚀的零件
ZHSi 80-3-3	为硅铅黄铜，铸造性能好，强度较高，耐磨性和耐蚀性优良，切削性中等，可作为耐磨合金锡青铜 6-6-3 和其它牌号耐磨青铜的代用品	用于铸造在摩擦条件下工作的轴承、衬套和化工机械零件
ZHSi 80-3	为硅黄铜，铸造性能优良，流动性好，能获得紧密、无气孔而有光洁表面的铸件，有较高的强度和良好的塑性，高温强度较高，在大气、淡水和海水中的耐蚀性高，耐磨性亦可，焊接性良好，切削性中等，价廉，原料易得	在海水、淡水和蒸汽(<265℃)条件下工作的零件，如水门管子配件、阀体、阀盖和某些异形铸件以及船舶零件
ZHPb 59-1	为铅黄铜，它的特点是切削性优良，在这方面是铸造黄铜中最好的；合金的强度不高，但塑性较好，耐磨性高，对一般腐蚀有良好的稳定性，易钎焊、焊接，铸造性能亦好	主要用于铸造耐磨零件，如滚珠轴承的轴承套和大型轴套
ZHPb 48-3-2-11	为加有少量铁、锰元素的铅黄铜，它的特点是强度高，耐磨性好，在大气、淡水、海水中的耐蚀性佳，铸造性能尚好，但体积收缩率高(4.3～4.5%)，切削性优良	用于各种耐磨及结构零件，如阀门、垫圈、蜗轮、轴瓦、轴套等
ZHAl 66-6-3-2	为铝铁锰黄铜，具有很高的强度、硬度和耐磨性，在这方面是铸造黄铜中最好的，但塑性较低，在大气，淡水中的耐蚀性高，焊接性较差，切削性尚可，铸造性尚好	在重载荷条件下工作的压紧螺钉的螺母及大型蜗杆以及衬套、轴承等，可作为 ZQAl 10-4-4 及 11-6-6 的代用品
ZHA 7 67-2-5	铝黄铜，铸造性能好，有较高的强度和耐磨性，在大气中的耐蚀性高，对海水有一定的耐蚀性，切削性中等，钎焊性能不好，电焊性能良好	海船及普通机器制造中的耐蚀零件，可作为 ZQSn 3-7-5-1 及 3-12-5 铸造锡青铜的代用品
ZHFe 59-1-1	铁黄铜，铸造流动性极好，但线收缩率较大；具有较高的强度、韧性，减摩性能良好，在大气、海水中的耐蚀性高，被切削加工性尚可	在摩擦和受海水腐蚀条件下工作的结构零件，如耐摩擦圈、衬套、轴承、管路附件以及化工设备中耐压管板件
ZHMn 55-3-1	锰铁黄铜，铸造性能尚好，具有高的强度、硬度和耐磨性(仅次于ZHAl 66-6-3-2)，在海水中的耐蚀性高，耐热性优于其它铸造黄铜，焊接性良好，切削性尚可	形状不复杂的重要零件，温度达 300℃ 以下及 100 大气压以下的重型海轮配件，如螺旋桨和桨叶及其它管配件
ZHMn 58-2-2	锰铅黄铜，铸造流动性良好，具有较高的抗拉强度和屈服极限，减摩性能优良，切削性中等，在大气、淡水和海水中的耐蚀性高	在摩擦条件下工作的轴承、衬套及其它耐磨零件，如车辆轴承内衬
ZHMn 58-2	锰黄铜，铸造性能好，具有较高的强度和塑性，在海水、过热蒸汽和氯化物中有高的耐蚀性，切削性尚可，导热导电性低	在海水、淡水、蒸汽(<300℃)和液体燃料中工作的耐蚀零件，如泵、活塞、填料箱、衬套、冷凝器、管接头和阀门等

2.3 青铜

青铜在早期系指锡青铜。但锡昂贵，因此，研究不含锡的青铜代用材料受到了人们的重视。近代新发展起来的以铝、锰、硅等元素代替锡，而完全不含锡的铜合金也称青铜。为了加以区别，前者称为普通青铜或锡青铜；后者称特种青铜或无锡青铜。

1）锡青铜　二元锡青铜的特点是耐蚀、耐磨、弹性好和铸造体积收缩率很小，但铸件的致密性差，易渗漏，不宜铸造气密性要求高的零件。在铸态下合金强度随含锡量增大而升高，但当锡含量超过6％～7％后，由于出现脆性相 δ（$Cu_{31}Sn_8$），塑性急剧降低。对于变形用合金，锡含量一般在7％以下；铸造用合金，可以允许高一些。

为了改善二元锡青铜的使用性能和工艺性能，几乎全部工业用锡青铜都分别加有锌、磷、铅、镍等元素，构成多元锡青铜。锌能改善铸造性，提高铸件致密度和机械性能。微量磷（0.3％以下）能有效地提高合金的机械性能，特别是弹性极限和疲劳极限。含磷过高，轧制时出现热脆现象，故变形用锡磷青铜的含磷量在0.3％以下，而铸造用锡磷青铜则可达1％。铅能改善青铜的耐磨性和切削加工性，但降低其机械性能。镍能细化青铜晶粒，提高机械性能和耐蚀性。

2）无锡青铜　无锡青铜有很多种，均以主加元素冠于“青铜”前面而得名，如主加元素为铝，称铝青铜。

（1）铝青铜是铜、铝以及锰、铁或镍的多元合金。铝含量增加，合金强度提高。当铝量超过8％时，塑性强烈降低。铝能在铜表面形成致密的氧化膜，具有很高的抗蚀性，比黄铜和锡青铜的抗蚀性还要好。锰能提高合金强度，避免自发回火脆性。铁能细化合金晶粒，但含量超过5％时，会恶化合金的耐蚀性能。镍能大大提高Cu-Al合金的机械性能，特别是屈服极限。此外，镍还能提高热强性和耐蚀性。含锰、铝、铁、镍的牌号为ZQAl 12-8-3-2的高锰铝青铜，用砂型铸造时，抗拉强度达660～770 MPa，伸长率达20％，在海水中有很高的腐蚀疲劳强度，抵抗腐蚀性破裂和腐蚀空化的能力，是一种优良的海船用螺旋桨材料。其它牌号的铝青铜也都具有超过锡青铜的良好性能，是各种青铜中应用最广的一种，常用来制造重要的齿轮、蜗轮、轴套、船舶零件以及其它要求抗磨耐蚀的重要零件。

（2）硅青铜是一种很有发展前途的合金。它具有很高的弹性性能，可用于在海水中工作的弹簧。含镍的硅青铜具有高的强度、耐磨性和耐蚀性，常用于仪表制造中。

（3）锰青铜具有高的热强性、耐蚀性，可用于制造在腐蚀介质中工作的零件，如锅炉上的蒸汽阀门多用这种材料制造。

（4）含有铍、镉、铬及其它元素的青铜是一组特别的特殊青铜。它们不但具有高的导热性、导电性和热弹性，同时还有高的机械性能和耐磨性能，其中，铍青铜尤为突出。含铍1.7％～2％的铍青铜淬火时效后，抗拉强度极限可达1150 MPa，是一种不可多得的合金，常用作高级精密的弹性元件（如弹簧、膜片、膜盒等）及特殊要求的耐磨元件（如罗盘及仪表的机械传动零件等）。

青铜加工产品的牌号、化学成分、典型机械性能见表3.1.5-19、表3.1.5-20。青铜加工产品的主要特性和用途见表3.1.5-21。铸造青铜的牌号、化学成分、机械性能见表3.1.5-22。铸造青铜的主要特性和用途见表3.1.5-23。

表 3.1.5-19　　加工青铜的组别、代号和主要化学成分(摘自GB 5233—85)

组别	代号	主要化学成分(%)							杂质总和(%)(重量)
		Sn	Al	Mn	Pb	Si	其它	Cu	
锡青铜	QSn 4-3	3.5～4.5					Zn 2.7～3.3	余量	≤0.2
	QSn 4-4-2.5	3.0～5.0			1.5～3.5		Zn 3.0～5.0	余量	≤0.2
	QSn 4-4-4	3.0-5.0			3.5～4.5		Zn 3.0～5.0	余量	≤0.2
	QSn 6.5-0.1	6.0～7.0					P 0.10～0.25	余量	≤0.1
	QSn 6.5-0.4	6.0～7.0					P 0.26～0.40	余量	≤0.1
	QSn 7-0.2	6.0～8.0					P 0.10～0.25	余量	≤0.15
	QSn 4-0.3	3.5～4.5					P 0.20～0.40	余量	≤0.1
铝青铜	QAl 5		4.0～6.0					余量	≤1.6
	QAl 7		6.0～8.0					余量	≤1.6
	QAl 9-2		8.0～10.0				Mn 1.5～2.5	余量	≤1.7
	QAl 9-4		8.0～10.0				Fe 2.0～4.0	余量	≤1.7
	QAl 10-3-1.5		8.5～10.0	1.0～2.0			Fe 2.0～4.0	余量	≤0.75
	QAl 10-4-4		9.5～11.0				Fe 3.5～5.5 Ni 3.5～5.5	余量	≤1.0
	QAl 11-6-6		10.0～11.5				Fe 5.0～6.5 Ni 5.0～6.5	余量	≤1.5
	QAl 9-5-1-1		8.0～10.0	0.5～1.5			Ni 4.0～6.0 Fe 0.5～1.5	余量	≤0.6
	QAl 10-5-5		8.0～11.0	0.5～2.5			Fe 4.0～6.0 Ni 4.0～6.0	余量	≤1.2
铍青铜	QBe 2	Be 1.80～2.1					Ni 0.2～0.5	余量	≤0.5
	QBe 1.9	Be 1.85～2.1					Ni 0.2～0.4 Ti 0.1～0.25	余量	≤0.5
	QBe 1.7	Be 1.6～1.85					Ni 0.2～0.4 Ti 0.1～0.25	余量	≤0.5
	QBe 1.9～0.1	Be 1.85～2.1	Mg 0.07～0.13				Ni 0.2～0.4 Ti 0.1～0.25	余量	≤0.5
硅青铜	QSi 3-1			1.0～1.5		2.7～3.5		余量	≤1.1
	QSi 1-3			0.1～0.4		0.6～1.1	Ni 2.4～3.4	余量	≤0.5
	QSi 3.5-3-1.5			0.5～0.9		3.0～4.0	Zn 2.5～3.5 Fe 1.2～1.8	余量	≤1.1
锰青铜	QMn 1.5			1.2～1.8				余量	≤0.3
	QMn 2			1.5～2.5				余量	≤0.5
	QMn 5			4.5～5.5				余量	≤0.9
锆青铜	QZr 0.2	Zr 0.15～0.30						余量	≤0.5
	QZr 0.4	Zr 0.30～0.50						余量	≤0.5

组别	代号	主要化学成分（%）							杂质总和（%）（重量）
		Sn	Al	Mn	Pb	Si	其它	Cu	
组别	代号	主要化学成分（%）							杂质总和（%）（重量）
		Sn	Al	Mn	Pb	Si	其它	Cu	
铬青铜	QCr 0.5	Cr 0.40～1.10						余量	≤0.5
	QCr 0.5-0.2-0.1	Cr 0.4～1.0，Al 0.1～0.25，Mg 0.1～0.25						余量	≤0.5
	QCr 0.6-0.4-0.05	Cr 0.4～0.8，Zr 0.3～0.6，Mg 0.04～0.08						余量	≤0.5
镉青铜	QCd 1	Cd 0.8～1.3						余量	≤0.3
镁青铜	QMg 0.8	Mg 0.70～0.85						余量	≤0.3

表 3.1.5-20 **常用加工青铜产品的机械性能**

合金代号	半成品种类	尺寸（mm）	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$（MPa）	伸长率 δ_{10}（%）≥	伸长率 δ_5（%）≥	标准号
QSn 4-3	冷轧板材	厚度 0.2～12	软（M） 硬（Y） 特硬（T）	294 490～687 637	38① 3① 1①	— — —	GB 2048—80
QSn 4-0.3	冷轧带材	厚度 0.05～1.2					GB 2066—80
QSn 4-3	拉制棒材	直径 5～12 >12～25 >25～35 >35～40	硬（Y）	432 373 333 314	10 15 16 16	14 21 23 23	GB 4432—84
	挤制棒材	直径 40～120	热挤（R）	275	25	30	
	拉制线材	直径 0.1～1.0 >1.0～2.0 >2.0～4.0 >4.0～6.0	硬（Y）	883～1128 863～1059 834～1030 785～981	— — 1② 1②	— — — —	GB 3124—82
QSn 4-0.3	拉制棒材	直径 5～12 >12～25 >25～40	硬（Y）	412 392 353	8 10 12	10 13 15	GB 4432—84
QSn 4-4-4 QSn 4-4-2.5	冷轧板材	厚度 0.8～5.0	软（M） 1/3 硬（Y_3）	294 392～490	35 10	— —	GB 2049—80
	冷轧带材	厚度 0.8～1.2	半硬（Y_2） 硬（Y）	422～510 板 510 带 490	9 5	— —	GB 2067—80
QSn 6.5-0.1 QSn 6.5-0.4	冷轧板材	厚度 0.2～12	软（M） 硬（Y） 特硬（T）	294 490～687 637	38① 5① 1①	— — —	GB 2048—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	软（M） 硬（Y） 特硬（T）	294 539～687 667	38① 8① 2①	— — —	GB 2066—80

续上表

合金代号	半成品种类	尺　寸（mm）	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$（MPa）	伸长率		标 准 号
					δ_{10}（%）　≥	δ_5	
QSn 6.5-0.1 QSn 6.5-0.4	拉制管材	外径　4～50	硬　（Y） 软　（M）	539 324	2 40	— —	沪Q/YB 254—64
	拉制棒材	直径　5～12 >12～25 >25～40	硬　（Y）	471 441 412	11 13 15	13 15 18	GB 4432—84
	挤制棒材	直径　30～40 >40～100 >100～120	热挤　（R）	353 343 314	50 55 58	55 60 —	GB 4432—84
QSn 6.5-0.1 QSn 6.5～0.4	拉制线材	直径 0.1～1.0 >1.0～2.0 >2.0～4.0 >4.0～6.0	硬　（Y）	883～1128 863～1059 834～1030 785～981	— — 1② 1②	— — — —	GB 3124—82
QSn 7-0.2	拉制棒材	直径　5～40	硬　（Y）	441	15	—	GB 4432—84
	挤制棒材	直径 40～150	热挤（R）	353	55	—	
	板、带、线	与 QSn 6.5-0.1 相同					
QAl 5	冷轧板材	厚度 0.4～12	软　（M）	275	33	—	GB 2043—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	硬　（Y）	588	2.5	—	GB 2062—80
QAl 7	冷轧板材	厚度 0.4～12	半硬（Y_2）	588～736	10	—	GB 2043—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	硬　（Y）	637	5	—	GB 2062—80
QAl 9-2	冷轧板材	厚度 0.4～12	软　（M） 硬　（Y）	441 588	18 5	— —	GB 2043—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	软　（M） 硬　（Y） 特硬（T）	441 588 883	18 5 —	— — —	GB 2062—80
	拉制棒材	直径　5～40	硬　（Y）	539	13	15	GB 4429—84
	挤制棒材	直径　25～45 >45～120	热挤　（R）	490 471	15 20	18 24	
	挤制管材	外径 20～250	热挤　（R）	471	15	—	YB 449—78
QAl 9-4	冷轧板材	厚度 0.4～12	硬　（Y）	588	—	—	GB 2043—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	硬　（Y）	637	—	—	GB 2062—80
	挤制棒材	直径 10～120 >120～160	热挤　（R）	539 490	15 12	17 13	GB 4429—84
	挤制管材	外径 20～250	热挤　（R）	490	15	—	YB 449—78

续上表

合金代号	半成品种类	尺寸（mm）	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 δ_{10} (%) ≥	伸长率 δ_5 (%) ≥	标准号
QAl 10-3-1.5	挤制棒材	直径 10～16 >16～160	热挤 (R)	608 588	8 12	— 13	GB 4429—84
	挤制管材	外径 20～250	热挤 (R)	588	12	—	YB 449—78
QAl 10-4-4	挤制棒材	直径 10～29 >29～120 >120～160	热挤 (R)	687 637 588	4 5 5	5 6 6	GB 4429—84
	挤制管材	外径 20～250	热挤 (R)	637	5	—	YB 449—78
QAl 11-6-6	挤制棒材	直径 10～28 >28～50	热挤 (R)	687 637	4 5	— —	GB 4429—84
GSi 1-3	挤制棒材	直径 20～80	热挤 (R)	490	10	—	GB 4431—84
QSi 3-1	冷轧板材	厚度 0.5～10	软 (M) 硬 (Y) 特硬 (T)	343 588～736 687	40 3 1	— — —	GB 2047—80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	软 (M) 硬 (Y) 特硬 (T)	373 637～785 736	45 5 2	— — —	GB 2065—80
	拉制棒材	直径 5～12 >12～40	硬 (Y)	490 471	10 15	14 20	GB 4431—84
	挤制棒材	直径 30～100	热挤 (R)	343	20	23	
	拉制线材	直径 0.1～0.5 >0.5～2.5 >2.5～4.0 >4.0～6.0	硬 (Y)	883～1128 883～1079 834～1030 785～981	— — — —	— — — —	GB 3123—82
QMn 1.5	冷轧板材	厚度 0.5～5.0	软 (M)	206	30	—	GB 2046—80
	冷轧带材	厚度 0.1～1.2					GB 2064—80
QMn 5	冷轧板材	厚度 0.5～5.0	软 (M)	294	30	—	GB 2046—80
	冷轧带材	厚度 0.1～1.2	硬 (Y)	441	3	—	GB 2064—80
QBe 2	条材	厚度 0.1～6.0	软 (M) 硬 (Y)	392～588 637	30 2.5	— —	YB 552—75
	带材	厚度 0.05～1.0	淬火后时效 冷轧后时效	1128 1177	2 1.5	— —	
	拉制棒材	直径 5～40	软 (M) 硬 (Y)	392 736	30 —	— —	YB 720—70
	挤制棒材	直径 20～120	热挤 (R)	392	20	—	
	调质棒材			1275～1324	0.5	—	
	拉制线材	硬化调质前所有尺寸	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	373～569 539～785 >785	— — — —	— — — —	GB 3134—82
		硬化调质后所有尺寸	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	>1030 >1177 >1275	— — —	— — —	

① δ ($l_0=11.3\sqrt{F_0}$) %。
② δ ($l_0=100$ mm) %。

表 3.1.5-21　　青铜加工产品的主要特性和用途举例

组别	合金牌号	主要特性	用途举例
锡青铜	QSn 4-3	为含锌的锡青铜，有高的耐磨性和弹性，抗磁性良好，能很好地承受热态或冷态压力加工；在硬态下，切削性好，易焊接和钎焊，在大气、淡水和海水中耐蚀性好	制作弹簧（扁弹簧、圆弹簧）及其它弹性元件，耐蚀零件以及耐磨零件（如衬套、圆盘、轴承等）和抗磁零件
	QSn 4-4-2.5 QSn 4-4-4	为添有锌、铅合金元素的锡青铜，有高的减摩性和良好的切削性，易于焊接和钎焊，在大气、淡水中具有良好的耐蚀性，只能在冷态下进行压力加工，因含铅，热加工时易引起热脆	制作在摩擦条件下工作的轴承、卷边轴套、衬套、圆盘以及衬套的内垫等。QSn 4-4-4 使用温度可达 300℃ 以下，是一种热强性较好的锡青铜
	QSn 6.5-0.1	磷青铜，有高的强度、弹性、耐磨性和抗磁性，在热态和冷态下压力加工性良好，对电火花有较高的抗燃性，可焊接和钎焊，切削性好，在大气和淡水中耐蚀	制作弹簧和导电性好的弹簧接触片，精密仪器中的耐磨零件和抗磁零件，如齿轮、电刷盒、振动片、接触器
	QSn 6.5-0.4	磷青铜，性能用途和 QSn 6.5-0.1 相似，因含磷量较高，其抗疲劳强度较高，弹性和耐磨性较好，但在热加工时有热脆性，只能接受冷压力加工	除用作弹簧和耐磨零件外，主要用于单位负荷<10 MPa、圆周速度<3 m/s 的条件下工作的零件
	QSn 7-0.2	磷青铜，强度高，弹性和耐磨性好，易焊接和钎焊，在大气、淡水和海水中耐蚀性好，切削性良好，适于热压加工	制作中等负荷、中等滑动速度下承受摩擦的零件，如抗磨垫圈、轴承、轴套、蜗轮等，还可用作弹簧、簧片等
	QSn 4-0.3	磷青铜，有高的机械性能、耐蚀性和弹性，能很好地在冷态下承受压力加工，也可在热态下进行压力加工	主要制作压力计弹簧用的各种尺寸的管材
铝青铜	QAl 5	为不含其它元素的铝青铜，有较高的强度、弹性和耐磨性，在大气、淡水、海水和某些酸中耐蚀性高，可电焊、气焊，不易钎焊，能很好地在冷态或热态下承受压力加工，不能淬火回火强化	制作弹簧和其它要求耐蚀的弹性元件，齿轮摩擦轮，涡轮传动机构等，可作为 QSn 6.5-0.4、4-3 和 4-4-4 的代用品
	QAl 7	性能用途和 QAl 5 相似，因含铝量稍高，其强度较高	
	QAl 9-2	含锰的铝青铜，具有高的强度，在大气、淡水和海水中抗蚀性很好，可以电焊和气焊，不易钎焊，在热态和冷态下压力加工性均好	高强度耐蚀零件以及在 250℃ 以下蒸汽介质中工作的管配件和海船上零件
	QAl 9-4	为含铁的铝青铜。有高的强度和减摩性，良好的耐蚀性，热态下压力加工性良好，可电焊和气焊，但钎焊性不好，可用作高锡耐磨青铜的代用品	制作在高负荷下工作的抗磨、耐蚀零件，如轴承、轴套、齿轮、蜗轮、阀座等，也用于制作双金属耐磨零件
	QAl 10-3-1.5	为含有铁、锰元素的铝青铜，有高的强度和耐磨性，经淬火、回火后可提高硬度，有较好的高温耐蚀性和抗氧化性，在大气、淡水和海水中抗蚀性很好，切削性尚可，可焊接，不易钎焊，热态下压力加工性良好	制作高温条件下工作的耐磨零件和各种标准件，如齿轮、轴承、衬套、圆盘、导向摇臂、飞轮、固定螺母等。可代替高锡青铜制作重要机件
	QAl 10-4-4	为含有铁、镍元素的铝青铜，属于高强度耐热青铜，高温（400℃）下机械性能稳定，有良好的减摩性，在大气、淡水和海水中抗蚀性很好，热态下压力加工性良好，可热处理强化，可焊接，不易钎焊，切削性尚好	高强度的耐磨零件和高温下（400℃）工作的零件，如轴衬、轴套、齿轮、球形座、螺母、法兰盘、滑座等以及其它各种重要的耐蚀耐磨零件
	QAl 11-6-6	成分、性能和 QAl 10-4-4 相近	高强度耐磨零件和 500℃ 下工作的高温抗蚀耐磨零件

续上表

组别	合金牌号	主 要 特 性	用 途 举 例
铍青铜	QBe 2	为含有少量镍的铍青铜，是机械、物理、化学综合性能良好的一种合金。经淬火调质后，具有高的强度、硬度、弹性、耐磨性、疲劳极限和耐热性；同时还具有高的导电性、导热性和耐寒性，无磁性，碰击时无火花，易于焊接和钎焊，在大气、淡水和海水中抗蚀性极好	制作各种精密仪表、仪器中的弹簧和弹性元件，各种耐磨零件以及在高速、高压和高温下工作的轴承、衬套
	QBe 2.15	为不含其它合金元素的铍青铜，性能和 QBe 2 相似，但强度、弹性、耐磨性比 QBe 2 稍高，韧性和塑性稍低，对较大型铍青铜的调质工艺性能不如 QBe 2 好	同 QBe 2
	QBe 1.7 QBe 1.9	为含有少量镍、钛的铍青铜，具有和 QBe 2 相近的特性，但其优点是：弹性迟滞小、疲劳强度高，温度变化时弹性稳定，性能对时效温度变化的敏感性小，价格较低廉，而强度和硬度比 QBe 2 降低甚少	制作各种重要用途的弹簧、精密仪表的弹性元件、敏感元件以及承受高变向载荷的弹性元件，可代替 QBe 2 及 QBe 2.15 等牌号的铍青铜
硅青铜	QSi 1-3	为含有锰、镍元素的硅青铜，具有高的强度，相当好的耐磨性，能热处理强化，淬火回火后强度和硬度大大提高，在大气、淡水和海水中有较高的耐蚀性，焊接性和切削性良好	用于制造在 300℃ 以下，润滑不良、单位压力不大的工作条件下的摩擦零件（如发动机排气和进气门的导向套）以及在腐蚀介质中工作的结构零件
	QSi 3-1	为加有锰的硅青铜，有高的强度、弹性和耐磨性，塑性好，低温下仍不变脆；能良好地与青铜、钢和其它合金焊接，特别是钎焊性好；在大气、淡水和海水中的耐蚀性高，对于苛性钠及氯化物的作用也非常稳定；能很好地承受冷、热压力加工，不能热处理强化，通常在退火和加工硬化状态下使用，此时有高的屈服极限和弹性	用于制作在腐蚀介质中工作的各种零件，弹簧和弹簧零件，以及蜗轮、蜗杆、齿轮、轴套、制动销和杆类耐磨零件，也用于制作焊接结构中的零件，可代替重要的锡青铜，甚至铍青铜
锰青铜	QMn 5	为含锰量较高的锰青铜，有较高的强度、硬度和良好的塑性，能很好地在热态及冷态下承受压力加工，有好的耐蚀性，并有高的热强性，400℃ 下还能保持其机械性能	用于制作蒸汽机零件和锅炉的各种管接头、蒸汽阀门等高温耐蚀零件
	QMn 1.5	含锰量较 QMn 5 低，与 QMn 5 比较，强度、硬度较低，但塑性较高，其它性能相似	
镉青铜	QCd 1.0	具有高的导电性和导热性，良好的耐磨性和减摩性，抗蚀性好，压力加工性能良好，镉青铜的时效硬化效果不显著，一般采用冷作硬化来提高强度	用作工作温度 250℃ 下的电机整流子片、电车触线和电话用软线以及电焊机的电极和喷气技术中
铬青铜	QCr 0.5	在常温及较高温度下（<400℃）具有较高的强度和硬度，导电性和导热性好，耐磨性和减摩性也很好，经时效硬化处理后，强度、硬度、导电性和导热性均显著提高；易于焊接和钎焊，在大气和淡水中具有良好的抗蚀性，高温抗氧化性好，能很好地在冷态和热态下承受压力加工；但其缺点是对缺口的敏感性较强，在缺口和尖角处造成应力集中，容易引起机械损伤，故不宜于作整流子片	用于制作工作温度 350℃ 以下的电焊机电极、电机整流子片以及其它各种在高温下工作的、要求有高的强度、硬度、导电性和导热性的零件，还可以双金属的形式用于刹车盘和圆盘
	QCr 0.5-0.2-0.1	为加有少量镁、铝的铬青铜，与 QCr 0.5 相比，不仅进一步提高了耐热性，而且可改善缺口敏感性，其它性能和 QCr 0.5 相似	
锆青铜	QZr0.2 QZr0.4	为时效硬化合金，其特点是高温（400℃ 以下）强度比其它任何高导电合金都高，并且在淬火状态下具有普通纯铜那样的塑性，其它性能和QCr0.5-0.2-0.1相似	适于作工作温度 350℃ 以下的电机整流子片、开关零件、导线、点焊电极等

表 3.1.5-22　　**铸造青铜的分组、代号、化学成分和机械性能**（摘自 GB 1176—74）

序号	合金牌号	合金代号	主要化学成分（%）									铸造方法	机械性能（不低于）		
			锡	锌	铅	磷	镍	铝	铁	锰	铜		抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	布氏硬度 HB
	（一）锡青铜														
1	3-12-5 锡青铜	ZQSn 3-12-5	2.0~4.0	9.0~13.0	3.0~6.0						其余	S J	180 220	8 10	60 60
2	3-7-5-1 锡青铜	ZQSn 3-7-5-1	2.0~4.0	6.0~9.0	4.0~7.0		0.5~1.5				其余	S J	180 220	8 10	60 70
3	5-5-5 锡青铜	ZQSn 5-5-5	4.0~6.0	4.0~6.0	4.0~6.0						其余	S J	180 200	8 10	60 65
4	6-6-3 锡青铜	ZQSn 6-6-3	5.0~7.0	5.0~7.0	2.0~4.0						其余	S J	180 200	8 10	60 65
5	7-0.2 锡青铜	ZQSn 7-0.2	6.0~7.0			0.1~0.4					其余	S J	200 220	10 15	70 80
6	10-1 锡青铜	ZQSn 10-1	9.0~11.0			0.6~1.2					其余	S J	220 250	3 5	80 90
7	10-2-1 锡青铜	ZQSn 10-2-1	9.0~11.0		1.0~2.5	0.6~1.2					其余	J	250	5	75
8	10-2 锡青铜	ZQSn 10-2	9.0~11.0	1.5~3.5							其余	S J	200 250	10 6	70 80
9	10-5 锡青铜	ZQSn 10-5	9.0~11.0		4.0~6.0						其余	S J	200 250	10 10	70 70
	（二）铅青铜														
10	10-10 铅青铜	ZQPb 10-10	8.0~11.0		8.0~11.0						其余	S J	150 200	3 5	65 70
11	12-8 铅青铜	ZQPb 12-8	7.0~9.0		11.0~13.0						其余	S J	150 200	6 3	60 65
12	17-4-4 铅青铜	ZQPb 17-4-4	3.5~5.0	2.0~6.0	14.0~20.0						其余	S J	150 180	5 7	55 60
13	24-2 铅青铜	ZQPb 24-2	1.0~3.0		20.0~25.0						其余	J	100	6	35
14	25-5 铅青铜	ZQPb 25-5	4.0~6.0		23.0~27.0						其余	S J	140 150	4 6	45 55
15	30 铅青铜	ZQPb 30			27.0~33.0						其余	J	—	—	25
	（三）铝青铜														
16	9-2 铝青铜	ZQAl 9-2						8.0~10.0		1.5~2.5	其余	S J	400 450	20 20	85 95
17	9-4 铝青铜	ZQAl 9-4						8.0~10.0	2.0~4.0		其余	S J	400 500	10 12	100 110
18	10-3-1.5 铝青铜	ZQAl 10-3-1.5						9.0~11.0	2.0~4.0	1.0~2.0	其余	S J	450 500	10 20	110 120

注：①合金代号中"Z"、"Q"为"铸"、"青"二字汉语拼音第一个字母，化学元素符号为主要添加元素，并以此分组；其后数字为该合金的成分数字组。

②铸造方法代号：S——砂型铸造；J——金属型铸造。

表3.1.5-23 铸造青铜的主要特性和用途举例

组别	合金代号	主要特性	用途举例
锡青铜	ZQSn 3-12-5	为锡铅锌（低锡）青铜，铸造性能好，在大气、淡水、海水和蒸汽中的耐蚀性好，有较高的强度和塑性，减摩性能良好，切削性佳，钎焊性良好，可电焊，但气焊性能差	用于浇注巴氏合金的轴衬体，以及在淡水、海水和蒸汽中，压力不大于2.5 MPa的管配件
	ZQSn 3-7-5-1	为加有少量镍的锡铅锌（低锡）青铜，性能和ZQSn 3-12-5相似，但屈服强度较高，抗冲击韧性较好	用于浇注巴氏合金的轴衬体，以及在淡水、海水和蒸汽中，压力不大于2.5 MPa的管配件
	ZQSn 5-5-5	为锡铅锌（中锡）青铜，铸造性能好，耐磨、耐蚀，可钎焊，但气焊、电焊性能较差，切削性优良	用于中载、中速（<3 m/s）的耐磨抗蚀零件，如轴瓦、衬套、水缸套、涨圈、水轮、泵体和压盖等
	ZQSn 6-6-3	为应用广泛的锡铅锌（中锡）耐磨青铜，有良好的减摩性和铸造性，切削性良好，可钎焊，但电焊、气焊性能较差，在大气和淡水中有良好的耐蚀性，能很好地承受冲击载荷	用于中等或较高载荷下、中等圆周速度的轴瓦、轴承、小蜗轮、开合螺母等耐磨零件，以及在1 MPa压力以下工作的蒸汽管配件和水管配件
	ZQSn 7-0.2	为含磷量较低的中锡磷青铜，铸造性能好，强度较高于以上锡锌铅青铜，耐磨性好，易焊接和钎焊，在大气、淡水和海水中耐蚀性好，切削性良好	用于中等负荷、中等滑动速度下承受摩擦的零件，如轴承、轴套、蜗轮等
	ZQSn 10-1	为磷、锡含量较高的高锡磷青铜，有极好的减摩性、流动性和高硬度、高强度，耐冲击负荷，是一种最好的高锡耐磨青铜，但价格亦较昂贵，它的热稳定性好，可焊接和钎焊，在大气和淡水中有很好的耐蚀性，在海水中耐蚀性中等，切削性尚可，缺点是偏析倾向较大	用于铸造重要用途的耐磨、耐冲击负荷的零件，如齿轮、蜗轮、摩擦轮、主轴轴承、轴瓦等及100℃以下工作的特种衬垫、自动机床丝杠螺母等
	ZQSn 10-2-1	为加有铅的高磷、高锡——磷青铜，性能用途和ZQSn 10-1相似，因加入了铅，切削性比ZQSn 10-1好	用于铸造重要用途的耐磨、耐冲击负荷的零件，如齿轮、蜗轮、摩擦轮、主轴轴承、轴瓦等及100℃以下工作的特种衬垫、自动机床丝杠螺母等
	ZQSn 10-2	为加有少量锌的高锡青铜，铸造性能好，有良好的减摩性和机械性能，焊接性能良好，切削性尚好，易于研磨抛光，在海水、煤油、汽油以及酒精中都很稳定	中等及较高载荷和小滑动速度的耐磨零件以及1.5 MPa压力以上的重要管配件，如齿轮、蜗轮、叶轮、阀、旋盖、泵体、泵盖等
铅青铜	ZQPb 30	为典型的铜-铅二元合金。其特点是在高温（<300℃）高压（25～30 MPa）和高速（8～10 m/s）工作条件下，具有高的疲劳强度，并在冲击负荷下产生开裂的倾向比其它耐磨合金小；此外，还有很高的导热性（比锡青铜大4倍、比锡基巴氏合金大6倍，从而大大降低了轴颈的发热程度）；摩擦系数小（耐磨性比锡基巴氏合金要大一倍）；切削性良好，缺点是：（1）铅的加入，大大降低了合金的机械性能，因而只能浇注在钢背上，以双金属轴承状态使用，（2）浇注时，由于铅的比重大而易产生偏析、分层现象，质量不易得到保证，因而铸造工艺较为复杂，（3）抗蚀性较差	可代替锡青铜或巴氏合金用作轴承合金，主要用于浇注承受高载荷、高速度和高温下工作的双金属轴承，如：大功率柴油机曲轴和连杆的轴承以及其它高负荷高速机器的轴承
	ZQPb 10-10	为加有锡的高锡、低铅三元铜铅合金，具有较高的抗拉强度、硬度和韧性，它的机械性能是铅青铜中最好的；同时还具有高的疲劳强度，和ZQPb 30一样好的减摩性能，切削性良好，耐蚀性高，铸造性能较好，易于焊接和钎焊；缺点是导热性比ZQPb 30差	用于铸造发动机、汽轮机、发电机和机床中承受中等载荷的整体轴承、轴瓦或双金属轴承以及耐酸铸件

续上表

组别	合金代号	主要特性	用途举例
铅青铜	ZQPb 12-8	成分性能和 ZQPb 10-10 相近，但其含铅量较高、含锡量稍低，因而价格比 ZQPb 10-10 较低	用于铸造在高压力下工作的重要轴承，如冷轧机轴承
	ZQPb 17-4-4	为以锌代锡的中等含锡量铅青铜，这种合金的机械性能和耐磨性能稍逊于 ZQPb 10-10 及 12-8，但其切削性较好，价格较廉，钎焊性能良好，电、气焊性能较差	可代替 ZQPb 10-10 及 12-8 用于铸造各种耐磨零件
	ZQPb 25-5	为含铅量较高、含锡量中等的铅青铜，具有较高的抗拉强度、硬度和疲劳性能（其机械性能稍低于 ZQPb 10-10、12-8 和 17-4-4，而高于 ZQPb 24-2 和 ZQPb 30），减摩性能优良，切削性极好（接近 HPb 63-3），钎焊性能良好，电焊性能也令人满意，但气焊性能较差，铸造性能尚好	适于铸造轻载荷、高速度下工作的整体轴承、轴瓦、活塞环，也可用于浇注内燃机、蒸汽机和高速泵等高载荷双金属轴承；是应用较为广泛的一种轴承合金
铝青铜	ZQAl 9-2	为铸铝锰青铜，有高的强度和耐蚀性，焊接性能良好，切削性较差，减摩性能优良；由于锰为抑制铝青铜徐冷脆性最有效的合金元素，并能降低合金熔点，改善铸造性能，所以这种合金是铸铝青铜中应用较为广泛的一个品种，缺点是铸造流动性较差	用于铸造形状简单的大型耐磨铸件，如齿轮、衬套、轴承、蜗轮等以及船舶上的耐磨抗蚀零件
	ZQAl 9-4	为含铁的铸铝青铜。有高的强度、耐蚀性以及良好的耐磨性，铸造性能尚可（流动性好），但其收缩率很大（2.25%），大型铸件在慢冷时有自行退火或徐冷脆性倾向；为了提高铸件塑性，防止脆性，一般均需进行正火或自 650℃ 在水中淬火，合金的焊接性能良好，但切削性较差，也是应用较为广泛的一种铸铝青铜	用于铸造在蒸汽或海水中工作的抗蚀零件和在高载荷及冲击载荷下工作的耐磨零件，如蜗轮、齿轮、衬套、轧钢机压下螺母、阀、活门座等，一般用作 ZQSn 10-1 及 6-6-3 的代用品
	ZQAl 10-3-1.5	为同时加有锰、铁元素的铸铝青铜，具有高的强度、耐蚀性，令人满意的耐磨性和热稳定性（在 600℃ 下仍能保持有足够的强度），焊接性良好，切削性较差；铸造流动性较好，徐冷脆性倾向较小，但为了提高塑性、防止脆性，一般均采用正火或自 650℃ 水淬的热处理工艺	用于铸造高压、高速和高温（400℃ 下）工作条件下重要的耐磨零件，如齿轮、蜗轮、螺母、轴套、轴承以及防锈零件

2.4 白铜

白铜主要是铜和镍的合金。单由铜和镍构成的合金称普通白铜；辅加有锰、铁、锌、铝等元素的合金，分别称为锰白铜、铁白铜、锌白铜和铝白铜。按用途分，白铜又可分为结构白铜和电工白铜。

结构白铜的特点是具有高的机械性能和高的抗蚀性，并具有耐热耐寒的性能，常用以制造在高温和强腐蚀介质中工作的零件，如精密机械和船舶机械零件。

电工白铜具有特殊的热电性质（如电阻率大，电阻温度系数小，电动势大等），在电工技术中获得了广泛的运用。工业上有名的锰铜、康铜和考铜就是不同含锰量的锰白铜，它们是制造精密电工测量仪器、变压器、热电偶、电热器等不可缺少的电工材料。

白铜加工产品的化学成分、性能和用途见表 3.1.5-24，表 3.1.5-25，表 3.1.5-26。

表 3.1.5-24　　加工白铜的组别、代号和主要化学成分（摘自 GB 5234—85）

组别	代号	主要化学成分（%）						杂质总和（%）
		Ni+Co	Fe	Mn	Al	Zn	Cu	
普通白铜	B 0.6	0.57~0.63					余量	≤0.1
	B 5	4.4~5.0					余量	≤0.5
	B 19	18~20					余量	≤1.8
	B 25	24~26					余量	≤1.8
铁白铜	BFe 10-1-1	9~11	1~1.5	0.5~1			余量	≤0.7
	BFe 30-1-1	29~32	0.5~1	0.5~0.2			余量	≤0.7
锰白铜	BMn 3-12	2~3.5	0.2~0.5	11.5~13.5	Si 0.1~0.3		余量	≤0.5
	BMn 40-1.5	39~41		1~2			余量	≤0.9
	BMn 43-0.5	42~44		0.1~1			余量	≤0.6
锌白铜	BZn 15-20	13.5~16.5				余量	62~65	≤0.9
	BZn 15-21-1.8	14~16	Pb 1.5~2.0			余量	60~63	≤0.9
	BZn 15-24-1.5	12.5~15.5	Pb 1.4~1.7	0.05~0.5		余量	58~60	≤0.75
铝白铜	BAl 13-3	12~15			2.3~3.0		余量	≤1.9
	BAl 6-1.5	5.5~6.5			1.2~1.8		余量	≤1.1

表 3.1.5-25　　常用加工白铜产品的机械性能

合金代号	半成品种类	尺寸（mm）	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$（MPa）	伸长率 $\delta_{10}, \geq$（%）	标准号
B 5	冷轧板材	厚度 0.5~10	软（M）	216	32	GB 2050-80
	冷轧带材	厚度 0.05~1.2	硬（Y）	373	10	GB 2068-80
	热轧板材	厚度 7~75	热轧（R）	—	—	GB 2050-80
B 19	冷轧板材	厚度 0.5~1.0	软（M）	294	30	GB 2050-80
			硬（Y）	392	3	
	冷轧带材	厚度 0.05~1.2	软（M）	294	25	GB 2068-80
			硬（Y）	392	3	
（B 30）①	冷轧板材	厚度 0.5~10	软（M）	373	23	GB 2050-80
	冷轧带材	厚度 0.05~1.2	硬（Y）	539	3	GB 2068-80
	拉制或轧制管材	外径 6~40	软（M）	373	23	YB 713-70
			半硬（Y_2）	490	6	
BMn 3-12	冷轧板材	厚度 0.5~10	软（M）	353	25	GB 2052-80
	冷轧带材	厚度 0.05~1.2	软（M）	353	25	GB 2070-80
	拉制线材	直径 ≤1.0	硬（Y）	785	—	GB 3125-82
			软（M）	441	20②	
		直径 >1.0	硬（Y）	687	—	
			软（M）	392	20②	

续上表

合金代号	半成品种类	尺　　寸（mm）	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ （MPa）	伸长率 $\delta_{10} \geq$ （%）	标准号
BMn 40-1.5	冷轧板材	厚度　0.5～10	软　（M） 硬　（Y）	392～588 588	实测 实测	GB 2052-80
	冷轧带材	厚度　0.05～1.2	软　（M） 硬　（Y）	392～588 637	实测 实测	GB 2070-80
	拉制线材	直径　0.05～0.20	软　（M） 硬　（Y）	392 687～981	15② —	GB 3125-82
		直径＞0.20～0.50	软　（M） 硬　（Y）	392 687～883	20② —	
		直径＞0.50～6.0	软　（M） 硬　（Y）	392 637～834	25② —	
BFe 30-1-1	拉制或轧制管材	外径　6～40	软　（M） 半硬　（Y_2）	373 490	23 6	YB 713-70
BZn 15-20	冷轧板材	厚度 0.5～10	软　（M） 半硬（Y_2）	343 441～569	35 5	GB 2053-80
	冷轧带材	厚度　0.05～1.2	硬　（Y） 特硬（T）	539～687 637	板　2 带　1.5 1	GB 2071-80
	拉制线材	直径　0.1～0.20	软　（M） 半硬（Y_2） 硬　（Y）	343 — 736～981	15② — —	GB 3125-82
		直径＞0.2～0.5	软　（M） 半硬　（Y_2） 硬　（Y）	343 490～736 736～932	20② — —	
		直径＞0.5～2.0	软　（M） 半硬　（Y_2） 硬　（Y）	343 441～687 637～883	25② — —	
		直径＞2.0～6.0	软　（M） 半硬　（Y_2） 硬　（Y）	343 441～637 539～785	30② — —	
	拉制棒材	直径　5～40 ＞5～12 ＞12～25 ＞25～40	软　（M） 硬　（Y） 硬　（Y） 硬　（Y）	294 441 392 343	30 5 7 12	GB 4433-84
	挤制棒材	直径　25～80	挤制（R）	294	30	
	拉制管材	外径　5～60	软　（M） 半硬　（Y_2） 硬　（Y）	294 392 490	30 15 3	YB 717-78
BAl 13-3	冷轧板材	厚度　0.5～12	淬火后冷轧 人工时效 （CYS）	637	5	GB 2051-80
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2		—	—	GB 2069-80
BAl 6-1.5	冷轧板材	厚度　0.5～12	硬　（Y）	539	3	GB 2051-80
	冷轧带材	厚度　0.05～1.2		带　588 板　637	5	GB 2069-80

① 带括号的代号，按 GB 5234—85《加工白铜》的规定，已经废除。
② 按 δ（l_0=100mm）%测定。

表 3.1.5-26　　　　白铜加工产品的主要特性及用途举例

组别	合金代号	主　要　特　性	用　途　举　例
普通白铜	B 0.6	为电工铜镍合金，其特性是温差电动势小，最大工作温度为 100℃	用于制造特殊温差电偶（铂-铂铑热电偶）的补偿导线
	B 5	为结构白铜，它的强度和耐蚀性都比铜高，无腐蚀破裂倾向	用作船舶耐蚀零件
	B 16	为电工铜镍合金，温差电动势小，最大工作温度为 100℃	用于制造特殊温差电偶（铂-金，钯-铂-铑热电偶）的补偿导线
	B 19	为结构铜镍合金，有高的耐蚀性和良好的机械性能，在热态及冷态下压力加工性良好，在高温和低温下仍能保持高的强度和塑性，切削性不好	用作在蒸汽、淡水和海水中工作的精密仪表零件、金属网和抗化学腐蚀的化工机械零件以及医疗器具、钱币
	B 30	为结构铜镍合金，具有高的机械性能和抗蚀性，在热态及冷态下压力加工性良好，由于其含镍量较高，故其机械性能和耐蚀性均较 B 5、B 19 高	用作在蒸汽、海水中工作的抗蚀零件以及在高温高压下工作的金属管和冷凝管等
锰白铜	BM 3-12	为电工铜镍合金，俗称锰铜，特点是有高的电阻率和低的电阻温度系数，电阻长期稳定性高，对铜的热电动势小	广泛用于制造工作温度在 100℃ 以下的电阻仪器以及精密电工测量仪器
	BM 40-1.5	为电工铜镍合金，通常称为康铜，具有几乎不随温度而改变的高电阻率和高的热电动势，耐热性和抗蚀性好，且有高的机械性能和变形能力	为制造热电偶（900℃ 以下）的良好材料，工作温度在 500℃ 以下的加热器（电炉的电阻丝）和变阻器
	BM 43-0.5	为电工铜镍合金，通常称为考铜，它的特点是，在电工铜镍合金中具有最大的温差电动势，并有高的电阻率和很低的电阻温度系数，耐热性和抗蚀性也比 BM 40-1.5 好，同时具有高的机械性能和变形能力	在高温测量中，广泛采用考铜作补偿导线和热电偶的负极以及工作温度不超过 600℃ 的电热仪器
铁白铜	BFe 30-1-1	为结构铜镍合金，有良好的机械性能，在海水、淡水和蒸汽中具有高的耐蚀性，但切削性较差	用于海船制造业中制作高温、高压和高速条件下工作的冷凝器和恒温器的管材
	BFe 5-1	为含镍较少的结构铁白铜，和 BFe 30-1-1 相比，其强度、硬度较低，但塑性较高，耐蚀性相似	主要用于船舶业代替 BFe 30-1-1 制作冷凝器及其它抗蚀零件
锌白铜	BZn 15-20	为结构铜镍合金，因其外表具有美丽的银白色，俗称德银（本来是中国银），这种合金具有高的强度和耐蚀性，可塑性好，在热态及冷态下均能很好地承受压力加工，切削性不好，焊接性差，弹性优于 QSn 6.5-0.1	用作潮湿条件下和强腐蚀介质中工作的仪表零件以及电讯工业零件、蒸汽配件和水道配件、日用品以及弹簧管和簧片等
	BZn 17-18-1.8	为加有铅的锌白结构合金，性能和BZn 15-20 相似，但它的切削性较好，而且只能在冷态下进行压力加工	用于制作精细零件
铝白铜	BAl 13-3	为结构铜镍合金，可以热处理，其特性是：除具有高的强度（是白铜中强度最高的）和耐蚀性外，还具有高的弹性和抗寒性，在低温（90°K）下机械性能不但不降低，反而有些提高，这是其它铜合金所没有的性能	用于制作高强度耐蚀零件
	BAl 6-1.5	为结构铜镍合金，可以热处理强化，有较高的强度和良好的弹性	制作重要用途的扁弹簧

2.5　铜合金的强化和热处理

冷变形是提高铜合金强度的常用方法，有些铜导线就是于冷作硬化状态下使用。当不需要铜合金在冷作硬化状态下使用时，可采用再结晶退火使冷变形金属软化。对于含氧铜，不宜在还原性气氛中退火，以免产生“氢病”。变形黄铜经去应力退火后，可防止“自裂”。冷变形-低温退火（即形变时效）是提高铜基合金弹性材料（如锡磷青铜）弹性极限的主要方法。

淬火时效对铍青铜有显著强化效果。一般来说，合金元素在固态铜中的溶解度随温度降低而剧烈减小时，就可能具有淬火时效强化效果，如 Cu-Ni-Al, Cu-Ni-Si 合金便是；若合金元素的溶解度不随温度降低而剧烈减少时，但只要室温下的溶解度在 0.2%以上，还可产生另一种强化，即固溶强化。此外，过剩相强化在铜合金中也是常用的强化方法；在保护气氛中或在真空炉中进行的光亮退火，可防止氧化，提高工件表面质量。

3 轴承合金

3.1 轴承合金的性能要求

滑动轴承（轴瓦）广泛用在轮机工程及其它各种工业设备上。它是由耐磨合金或是在钢底壳上浇上一层耐磨合金制成。制造滑动轴承内衬的合金称轴承合金。

轴承在工作时，承受轴传来的振动力有时甚至是冲击力，并和轴颈之间发生摩擦。在轴高速旋转时，或者润滑不良时，摩擦加剧，温度上升。此外，润滑油对轴承也有腐蚀作用。因此，轴承合金在工作温度下应具有足够的抗压强度和疲劳强度，要有一定的塑性和韧性，小的摩擦系数和膨胀系数，良好的导热性，能抵抗润滑油的腐蚀，成本要低。

轴承合金的理想组织是在软基体上分布着硬质点(占 13%～30%)，或是在硬的基体上分布着软质点。软的部分被磨损下凹，可储存润滑油，硬的部分凸起，支承轴颈。

常用轴承合金按成分可分为锡基、铅基、铜基和铝基轴承合金。

3.2 锡基轴承合金

锡基轴承合金一般称为巴比特合金或巴氏合金，是以锡、锑为基础并加有其它元素的合金。它的牌号是以“铸”“承”的汉语拼音字头“ZCh”加基本元素（锡）和主加元素（锑）的化学符号，加主加元素(锑)和辅加元素(铜)的百分含量组成的。如牌号为 ZchSnSb 11-6 的锡基轴承合金，含锑量为 11%，含铜量为 6％。加入的锑一部分溶于锡中，形成 α 固溶体（软基体），一部分与锡形成以锡锑化合物为基的固溶体（β 相，硬质点）。β 相密度小，在铸造时易产生比重偏析，加 5％～6％的铜可以防止比重偏析。同时，铜所形成的 Cu_6Sn_5 相，比 β 相有更高的硬度，可以进一步提高合金的硬度和耐磨性。

锡基轴承合金的抗咬合性、顺应性、耐蚀性好，膨胀系数小，但疲劳强度低，工作温度不宜大于 150℃。

锡基轴承合金常用于汽车、拖拉机、气体压缩机、冷冻机以及船用低速柴油机轴承。

锡基轴承合金的成分、性能、主要用途见表 3.1.5-27。

表 3.1.5-27　　锡基轴承合金的成分、性能和用途

代号	化学成分(%)						硬度	熔点	主要用途举例
	Sb	Cu	Pb	Ni	Sn	杂质总量	HB	(℃)	
ZChSnSb 4-4	4～5	4～5			余量	0.5	28.6	225	耐蚀、耐热、耐磨，适用于涡轮机及内燃机高速轴承及轴衬
ZChSnSb 7.5-3	7～8	3～4			余量	0.55	28.3	238	韧性与 ChSnSb 4-4 相同，适用于一般大机械轴承及轴衬

续上表

代号	化学成分(%)						硬度	熔点	主要用途举例
	Sb	Cu	Pb	Ni	Sn	杂质总量	HB	(℃)	
ZChSnSb 8-8	7.5~8.5	7.5~8.5			余量	0.65	34.3	239	硬度最高，可承受大负荷，适用于大型机器轴承及轴衬
ZChSnSb 12-3-10	11~13	2.5~3.5	9~11		余量	0.85	29.6	185	性软而韧，耐压，适用于一般发动机的主轴承，但不适用于高温部分
ZChSnSb 15-2-18	14~16	1.5~2.5	17~19		余量	0.85	29.6	185	适用于中等速度和压力的机器轴承，但不适用于高温部分
ZChSnSb 11-6	10~12	5.5~6.5			余量	0.55	30	241	较硬，适用于高速汽轮机和涡轮机，及高速内燃机等
ZChSnSb 8-3.5-0.3	7~8	3.4~4		0.3~0.4	余量	0.55	28.4	238	韧性高，耐压、耐磨、耐热，用途同 ChSnSb 7.5-3
ZChSnSb 9-7	8~10	6~8			余量	0.5			韧性高，适用于内燃机等轴承和轴衬
ZChSnSb 11-9	10~12	8~10			余量	0.3			适用于一般高速、高压的机器轴承及轴衬
ZChSnSb 13-5-12	15~12	4~6	11~13		余量	0.3			适用于一般中速、中压的各种机器轴承及轴衬

3.3 铅基轴承合金

铅基轴承合金又称铅基巴氏合金，有两类：1）铅锑系，除锑外，还含有锡、铜等其它元素；2）铅-钙-钠系。

锑能提高合金的强度；锡能提高合金强度和耐蚀性；铜能防止比重偏析。在含钙和钠的铅基轴承合金中，钠与钙溶于铅中形成的 α 固溶体是合金的软基体，钙还能与铅形成化合物 Pb_3Ca 作为硬质点。

铅-钙-钠系合金的性能比较好，常用于轴承中。铅-锑系的性能较差，但由于价格便宜，在工业中的应用仍然很广，通常用于制造低速、低负荷或静载中负荷机械设备轴承，而不适于制作有强烈振动和冲击条件下工作的轴承。

铅基轴承合金的成分和性能见表 3.1.5-28。

表 3.1.5-28 **铅基轴承合金的成分、性能和用途**

代号	化学成分(%)					硬度	熔点	用途
	Sn	Sb	Cu	Pb	其它	HB	(℃)	
ZChPbSn 20-15-1.5	19~21	14~16	1.25~1.75	62.5~64.5	—	21	181	中负荷中速机械轴衬
ZChPbSn 10-15	9.3~10.7	14~16	—	74~76	—	22	240	与 ChPbSn 20-15-1.5 相近但硬度略高
ZChPbSn 5-15	4.5~5.5	14~16	—	79~81	—	20	237	轻负荷低转速机械轴衬

续上表

代号	化学成分(%)					硬度	熔点	用途
	Sn	Sb	Cu	Pb	其它	HB	(℃)	
ZChPbSn 10-5	9～11	—	4～6	余量	—	—	—	—
ZChPbSn 10-15-1	9～11	14～16	0.7～1.1	余量	碲0.05～0.20	—	—	发动机轴衬
ZChPbSn 1-16-1	0.75～1.25	11.5～17.5		余量	砷0.8～1.4	20	208	重负荷高速机械轴衬
ZChPbSn 10-12	9～11	11.5～13.5		余量	—	27.5	244	与ChPbSn 10-15-1相近
ZChPbSn 5-9	4～6	8～10	—	余量	—	17.5	239	与ChPbSn 1-16-1相近
ZChPbSn 16-16-1.8	15～17	15～17	1.5～2.0	余量	—	30	240	轻负荷高速轴衬，如船舶、发动机等
ZChPbSn 10-14-1.6	9～11	13～15	1.5～2.0	余量	As 0.5～0.9 Cd 1.25～1.75 Ni 0.75～1.25	29	240	重负荷柴油机轴衬
ZChPbSn 7-13-1	6～8	12～14	—	余量	As 0.8～1.2	20～25	—	重负荷柴油机轴衬
ZChPbSn 2-0.45-0.35	1.25～2.5	Ca 0.35～0.55	Na 0.25～0.5	余量	Mg 0.04～0.09	—	—	有时代替ZChPbSn 16-16-1.8

3.4 铜基轴承合金

铜合金中常用作轴承合金的有锡青铜、铅青铜、铝青铜等。

铜铅合金的基本成分为铅25%～35%，其余为铜。此外，为了改善组织结构，提高某些性能，常加入第三种元素，如锡、镍、硫、银、锑等。

铜和铅在固态下完全不互溶，铜较硬，铅较软，以铜为基，在其上分布有部分软的铅质点，就构成了理想的轴承合金组织。但是，简单的二元铅青铜在浇注时比重偏析严重，加入第三元素，特别是硫能有效地阻止偏析。此外，第三元素还能提高机械性能。

与巴氏合金相比，铅青铜最突出之点是它的承载能力大，此外，其导热率高，机械性能受温度的影响小，即使在250℃的温度下，仍能正常工作。铅青铜的表面性能（顺应性、嵌藏性等）、耐蚀性较差。为了改善表面性能，常在表面上复以镀层，成为钢背-铜铅合金-表面复层三层结构轴承。表面复层成分一般包含锡、铅、铜、铟等，厚度为0.02～0.03 mm。铅青铜广泛用于制造高速、重载、大功率柴油机以及汽车、拖拉机轴承。

铅青铜的成分和性能见表3.1.5-29。

表3.1.5-29　　**铅青铜的成分和性能**

牌号	化学成分(%)				机械性能		
	Pb	Sn	Ni	Cu	σ_b(MPa)	δ(%)	HB
QPb 30	30			余量	60	4	25
QPb 25-5	25	5		余量	140	6	50
QPb 12-8	12	8		余量	120～200	3～8	80～120
QPb 60-2.5	60		2.5	余量	30	5	4

3.5 铝基轴承合金

铝基轴承合金常用的有两种:

（1）铝-锑-镁轴承合金　其成分为3.5%～5%的锑，0.3%～0.7%的镁，其余为铝。少量锑固溶于铝构成合金的软基体，大部分锑与铝生成金属化合物AlSb硬质点，镁也可形成 Mg_3Sb_2 硬质相，并能使针状的 AlSb 变为片状，改善合金的塑性、韧性和强度。

（2）铝-锡轴承合金　其含锡量达20%，甚至30%，还有1%的铜。锡在铝中的溶解度极微，锡与铝形成共晶体。铜能溶于铝中，可进一步提高基体强度。因此，这种合金的组织实为在较硬的铝基体上分布着软的锡质点。

为了提高轴承的承载能力，铝基轴承合金常与低碳钢一同轧制成双金属钢带以供使用。

铝基轴承合金的导热性好，疲劳强度和高温硬度高，化学稳定性好，能承受较大压强，价格低廉，我国已逐渐用它代替锡基、铅基和铜基轴承合金，广泛用于高速、高载下工作的汽车、拖拉机的柴油机轴承。主要缺点是线膨胀系数大，运转时容易与轴咬合，故需加大轴承间隙；又因其硬度高，容易伤轴，要求轴的硬度较高。

铝基轴承合金的化学成分、机械性能和应用范围见表3.1.5-30。

表3.1.5-30　铝基轴承合金的化学成分和性能

铝基轴承合金的种类、代号和化学成分

合金种类或代号		主要化学成分(%)							杂质(%)不大于						
		Sn	Cu	Mg	Sb	Si	Ni	Al	Fe	Si	Fe+Si	Mn	Zn	Pb	Ti
低锡铝合金	ZLSn 1	6～9	2.0～3.0	<1	—	—	1.0～1.5	其余	0.8	0.5	—	0.5	0.1	0.1	0.5
	ZLSn 2	6.5～7	1.0～1.5	—	—	2.0～2.5	0.5～1.0	其余	0.4	—	—	—	0.1	0.1	—
	ZLSn 3	2～4	3.5～4.5	1.0～2.0	—	—	—	其余	0.8	0.5	—	0.5	0.1	0.1	0.5
Al-Sb-Mg		—	—	0.3～0.7	3.5～5.5	—	—	其余	0.75	0.5					
20高锡		17.5～22.5	0.8～1.2	—	—	—	—	其余	0.70	0.5	1.5				
30高锡		27.5～32.5	0.8～1.2	—	—	—	—	其余	0.70	0.5	1.5				

铝基轴承合金的机械性能和应用范围

合金代号	铸造方法	热处理种类	抗拉强度 σ_b (MPa)	结合强度 (MPa)	延伸率 δ (%)	布氏硬度 HB	应用范围
ZLSn 1	J	T_2	150	—	10	45	用于高速重载荷的轴承
ZLSn 2	J	T_2	150	—	10	45	用于高速重载荷的轴承
ZLSn 3	J	T 7	—	—	—	100	用于中速中载荷的轴承
Al-Sb-Mg	—	—	60～65	50～70	—	25～28	用于双金属轴瓦材料，制造拖拉机轴承
20高锡	—	—	100～110	80～100	—	22～32	用于双金属轴瓦材料，制造汽车、拖拉机等不同内燃机轴承
30高锡	—	—	100～110	80～100	—	18～28	

铝合金轴瓦材料和其它轴瓦材料疲劳强度对比

轴瓦材料	合金层厚度 h (mm)	疲劳强度 (MPa)	负荷能力 (MPa)	备注
锡基巴氏合金	0.38	35.6	11.2	
铜铅轴承合金		77	23.8	含 Pb=30%
Al-Sb-Mg			24.6	
20高锡铝合金	0.38	100～130	28	有的可达30 MPa

4 钛和钛合金

钛有两种同素异晶体。在882.5℃以下为密排六方的 α-Ti，882.5℃以上直至熔点为体心立方晶格的 β-Ti。钛的相对密度4.5，熔点1668℃，膨胀系数和导热系数小，摩擦系数大（$f=0.2$），使切削、磨削加工困难。钛的强性模数较低，屈服强度比较高。钛的耐蚀性能极好，在硫酸、盐酸和硝酸中均具有良好的稳定性，在氢氧化钠等碱液中，在海水和大气中有优良的抗蚀性，但氢氟酸对钛有很大的侵蚀作用。工业纯钛的抗拉强度可达550 MPa，接近高强度铝合金的水平。工业纯钛有3个等级，即TA 1，TA 2，TA 3，可用来制造在350℃以下工作的零件。

将铝、钼、钒、铌、钽、铬、锰等元素加入钛中，就构成各种牌号的钛合金。工业钛合金按其使用状态下的组织分，可分为 α 钛合金，β 钛合金和 α+β 钛合金，分别以 TA，TB、TC 表示。

钛及钛合金广泛用于造船等领域，世界各国都在发展自己的钛工业。钛及钛合金的牌号、化学成分、机械性能及应用举例分别见表3.1.5-31～表3.1.5-36。

表3.1.5-31　　钛及钛合金的牌号和化学成分(摘自GB3620—83)

组别	牌号	化学成分组	主要成分(%)		
			Ti	Al	其它
工业纯钛	TAD	碘法钛	基		
	TA 1	工业纯钛（杂质极微）	基		
	TA 2	工业纯钛（杂质微）	基		
	TA 3	工业纯钛（杂质微）	基		
α型钛合金	TA 4	Ti-3 Al	基	2.0～3.3	
	TA 5	Ti-4 Al-0.005 B	基	3.3～4.7	B: 0.005
	TA 6	Ti-5 Al	基	4.0～5.5	
	TA 7	Ti-5 Al-2.5 Sn	基	4.0～6.0	Sn: 2.0～3.0
	TA 8	Ti-5 Al-2.5 Sn-3 Cu-1.5 Zr	基	4.5～5.5	Sn: 2.0～3.0, Cu: 2.5～3.2, Zr: 1.0～1.5
β型钛合金	TB 2	Ti-5 Mo-5 V-3 Cr-3 Al	基	2.5～3.5	Cr: 7.5～8.5, Mo: 4.7～5.7, V: 4.7～5.7
α+β型钛合金	TC 1	Ti-2 Al-1.5 Mn	基	1.0～2.5	Mn: 0.7～2.0
	TC 2	Ti-3 Al-1.5 Mn	基	3.5～5.0	Mn: 0.8～2.0
	TC 3	Ti-5 Al-4 V	基	4.5～6.0	V: 3.5～4.5
	TC 4	Ti-6 Al-4 V	基	5.5～6.8	V: 3.5～4.5
	TC 6	Ti-6 Al-1.5 Cr-2.5 Mo-0.5 Fe-0.3 Si	基	5.5～7.0	Cr: 0.8～2.3, Mo: 2.0～3.0, Fe: 0.2～0.7, Si: 0.15～0.40
	TC 7	Ti-6 Al-0.6 Cr-0.4 Fe-0.4 Si-0.01 B	基	5.0～6.5	Cr: 0.4～0.9, Fe: 0.25～0.60, Si: 0.25～0.60, B: 0.01
	TC 9	Ti-6.5 Al-3.5 Mo-2.5 Sn-0.3 Si	基	5.8～6.8	Mo: 2.8～3.8, Sn: 1.8～2.8, Si: 0.2～0.4
	TC 10	Ti-6 Al-6 V-2 Sn-0.5 Cu-0.5 Fe	基	5.5～6.5	Sn: 1.5～2.5, V: 5.5～6.5, Cu: 0.35～1.0, Fe: 0.35～1.0

表 3.1.5-32　　常用钛及钛合金加工产品的室温机械性能

代号	半成品种类	尺寸 (mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 $\delta_5 \geq$ (%)	断面收缩率 $\psi \geq$ (%)	冲击值 $a_k \geq$ (J/cm²)	标准号
TA 1	棒材	直径 ≤90	退 火	343	25	50	—	GB 2965—82
	板材	厚度 0.2~2	退 火	343~490	40	—	—	GB 3621—83
		2.1~10			30	—	—	
	带材	厚度 0.3~0.5	退 火	343	35	—	—	GB 3622—83
		>0.5~2			40	—	—	
	丝材	直径 0.1~6	冷 拔	实测	实测	—	—	GB 3623—83
	管材	外径 3~110	退 火	343~490	23(δ_{10})	—	—	GB 3624—83 及 3625—83
TA 2	棒材	直径 ≤90	退 火	441	20	40	—	GB 2965—82
	板材	厚度 0.3~1 1.1~2 2.1~10	退 火	441~588	35 30 25	— — —	— — —	GB 3621—83
	带材	厚度 0.3~0.5	退 火	392	25	—	—	GB 3622—83
		>0.5~2		441	30	—	—	
	丝材	直径 0.1~6	冷 拔	实测	实测	—	—	GB 3623—83
	管材	外径 3~110	退 火	441~588	18(δ_{10})	—	—	GB 3624—83 及 3525—83
TA 3	棒材	直径 ≤90	退 火	539	15	35	—	GB 2965—82
	板材	厚度 0.3~1	退 火	539~687	30	—	—	GB 3621—83
		1.1~2			25	—	—	
		2.1~10			20	—	—	
	丝材	直径 0.1~6	冷 拔	实测	实测	—	—	GB 3623—83
TA 5	棒材	直径 ≤90	退 火	687	15	40	58.8	GB 2965—82
	板材	厚度 0.5~1	退 火	687	20	—	—	GB 3621—83
		1.1~2			15	—	—	
		2.1~10			12	—	—	
	丝材	直径 0.1~6	冷 拔	实测	实测	—	—	GB 3623—83
TA 6	棒材	直径 ≤90	退 火	687	10	27	29.4	GB 2965—82
	板材	厚度 0.8~1.5	退 火	687	20	—	—	GB 3621—83
		1.6~2			25	—	—	
		2.1~10			12	—	—	
TA 7	棒材	直径 ≤90	退 火	785	10	27	29.4	GB 2965—82
	板材	厚度 0.8~1.5	退 火	736~932	20	—	—	GB 3621—83
		1.6~2			15	—	—	
		2.1~10			12	—	—	
	丝材	直径 0.1~6	冷 拔	实测	实测	—	—	GB 3623—83

续上表

代号	半成品种类	尺寸 (mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 $\delta_5 \geq$ (%)	断面收缩率 $\psi \geq$ (%)	冲击值 $a_k \geq$ (J/cm^2)	标准号
TA 8	棒材	直径 ≤90	退火	981	10	25	19.6~29.4	GB 2965—82
TB 2	棒材	直径 ≤90	淬火	≤981	18	40	29.4	GB 2965—82
			时效	1373	7	10	14.7	
	板材	1.0~3.5（厚度）	淬火	≤981	20	—	—	GB 3621—83
			淬火+时效	1324	8	—	—	
TC 1	棒材	直径 ≤90	退火	588	15	30	44.1	GB 2965—82
	板材	厚度 0.5~1	退火	588~736	25	—	—	GB 3621—83
		1.1~2			25	—	—	
		2.1~10			20	—	—	
	管材	外径 3~110	退火	588	(δ_{10}) 12	—	—	GB 3624—83
TC2	棒材	直径 ≤90	退火	687	12	30	39.2	GB 2965—82
	板材	厚度 1~2	退火	687	15	—	—	GB 3621—83
		2.1~10			12	—	—	
TC 4	棒材	直径 ≤90	退火	902	10	30	39.2	GB 2965—82
	板材	厚度 0.8~2	退火	902	12	—	—	GB 3621—83
		2.1~10			10	—	—	
	丝材	直径 2~6	冷拔	实测	实测	—	—	GB 3623—83
TC 5	棒材	直径 ≤90	退火	932	10	23	29.4	GB 2965—82
TC 6				932	10	23	29.4	
TC 7	棒材	直径 ≤90	退火	981	10	23	34.3	
	板材	厚度 1~2	退火	932	10	—	—	GB 3621—83
		2.1~10			8	—	—	
TC 8	棒材	直径 ≤90	退火	1030	10	30	29.4	GB 2965—82
TC 9				1059	9	25	29.4	
TC 10	锻棒	直径 ≤90	退火	1030	12	25	34.3	
	轧棒					30	39.2	
	板材	厚度 1~2	退火	1059	10	—	—	GB 3621—83
		2.1~10			8	—	—	
	管材	外径 3~110	退火	1030	12	—	—	GB 3624—83

注：①直径或边长>90 mm 的棒材，其横向机械性能由供方提供实测数据；如需考核时，其指标由供需双方协议。
②表中未列入的其它规格的板材、厚度>10 mm的板材，以及 R（热轧）、Y（冷轧）状态交货的板材或带材，如用户需要并在合同中注明时，其室温机械性能均报实测数据。
③直径≥1 mm的丝材，其室温 σ_b 和 δ_{100} 按实测数据，焊丝用的不做此项检验。

表 3.1.5-33　　常用钛及钛合金加工产品的高温机械性能

代　号	半成品种类	试验温度（℃）	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	持久强度 $\sigma_{100h} \geq$ (MPa)	标　准　号
TA 6	棒　材	350	422	392	GB 2965—82
	板　材	350 500	422 343	392 196	GB 3621—83
TA 7	棒　材	350	490	441	GB 2965—82
	板　材	350 500	490 441	441 196	GB 3621—83
TA 8	棒　材	500	687	490	GB 2965—82
TC 1	棒　材	350	343	324	
	板　材	350 400	343 314	324 294	GB 3621—83
TC 2	棒　材	350	422	392	GB 2965—82
	板　材	350 400	422 392	392 363	GB 3621—83
TC 3	板　材	400	588	539	GB 3621—83
TC 4		500	441	196	
TC 4	棒　材	400	618	569	GB 2965—82
TC 5		400	588	549	
TC 6		450	588	539	
TC 7	棒　材	450	588	—	
	板　材	500 550	588 539	— —	GB 3621—83
TC 8	棒　材	450	706	687	GB 2965—83
TC 9		500	785	588	
TC 10		400	834	785	
TC 10	板　材	400 450	883 834	785 490	GB 3621—83

表 3.1.5-34　　常用钛合金的低温机械性能（参考数据）

代号	温　度（℃）	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	ψ (%)
TA 7	20 −196 −253	741 1216 1543	687 1105 1265	15.0 20.0 19.5	30.2 31.0 9.2
TC 1	20 −196 −253	643 1133 1353	624 1071 931	21.3 25.0 15.4	54.0 49.3 —
TC 4	20 −196 −253	961 1510 1785	858 1407 1716	13.0 12.0 5.0	— — —

表 3.1.5-35　**钛在各种介质中的耐蚀性**

介　质	浓　度（%）	温　度	腐蚀速度（mm/年）	评　价①
盐　酸	5 5 10 20	室温 沸腾 室温 室温	0 6.53 0.175 1.34	优 差 良 差
硫　酸	5 5 60 80	室温 沸腾 室温 室温	0 13.01 0.277 32.66	优 差 良 差
硝　酸	37 37 64 64	室温 沸腾 室温 沸腾	0 小于 0.127 0 0.437	优 优 优 良
磷　酸	30 30	室温 沸腾	0 17.60	优 差
氯化钠	20℃饱和溶液	室温 沸腾	小于 0.127 小于 0.127	优 优
氢氧化钠	20 20	室温 沸腾	小于 0.127 小于 0.127	优 优

① 优——耐蚀，腐蚀速度在 0.127 mm/年以下；
良——中等耐蚀，腐蚀速度在 0.127～1.27 mm/年之间；
差——不耐蚀；腐蚀速度在 1.27 mm/年以上；
钛不发生局部腐蚀和晶间腐蚀，腐蚀是均匀进行的。
钛合金的耐蚀性与工业纯钛相近。

表 3.1.5-36　**常用钛及钛合金的特性和用途举例**

组别	代　号	主　要　特　性	用　途　举　例
工业纯钛	TA 1 TA 2 TA 3	纯钛塑性好、强度低(编号愈大则杂质含量愈多，少量杂质可使钛的强度、硬度显著增加，但塑性、韧性明显下降)，易于加工成形，冲压、焊接、切削性能良好；在大气、海水和大多数酸、碱、盐中有良好的耐蚀性，抗氧化性能优于大多数奥氏体不锈钢；使用温度不宜太高	350℃以下工作、受力小的零件和冲压件，船舶用耐海水腐蚀的管道、阀门、泵及水翼；化工热交换器、泵体、蒸馏塔；海水淡化系统零部件；柴油发动机活塞、连杆、叶簧等
α型钛合金	TA 4	在室温和使用温度下呈 α 单相状态，不能热处理强化，主要依靠固溶强化。室温下的强度不高，但高温（500～600℃）强度较好，且组织稳定，抗氧化性及抗蠕变性好，焊接性能和切削性能也较好，但塑性低、冲压性差	主要用作焊丝
	TA 5 TA 6 TA 7 TA 8		500℃以下工作的零件，如压气机壳体、叶片、喷管、导弹燃料罐、超音速飞机的涡轮机匣等
β型钛合金	TB 2	这类钛合金有较高的强度和优良的冲压性能，并可通过淬火和时效进一步强化；但性能不够稳定，熔炼工艺较复杂，故应用不如 α 型、α+β 型钛合金广泛	在 350℃以下工作的零件，如压气机叶片、轴、轮盘等重载荷旋转件等
α+β型钛合金	TC 1	室温下呈 α+β 两相组织，具有良好的综合机械性能，可热处理强化，锻造、冲压及焊接性能均较好，可切削加工；室温强度高，150～500℃下有较好的耐热性，有的（如 TC1、TC 4）并有良好的低温韧性和良好的抗海水应力腐蚀及抗热盐应力腐蚀的能力。这类合金以 TC 4 的应用最广，用量约占现有钛合金的一半	400℃以下工作的冲压和焊接零件，低温部件
	TC 2		500℃以下工作的焊接件、模锻件和经弯曲加工的零件
	TC 4		400℃以下长期工作的零件，结构用的锻件，各种容器、泵、低温部件；舰艇耐压壳体等
	TC 5		350℃以下工作的零件
	TC 10		450℃以下长期工作的零件

5 镍和镍合金

镍具有高的强度和塑性，高的耐蚀性，难熔，高的电真空性能等。镍能制成薄板、线材、深拉零件，镍也是制造镍合金以及其它耐氧化、耐高温、高电阻等特殊合金的重要元素。此外，纯镍通常用作电镀槽中的阳极，并用于电灯和电器工业中。

常用镍合金有：镍硅合金、镍锰合金、镍铬合金以及特殊镍合金等。镍硅合金的性能与纯镍的差别不大；镍锰合金的特点是耐热耐蚀性高；含镍80%，铬20%的镍铬合金，耐热性好，电阻大，是一种重要的电热合金。含铬较少（9%～10%）的镍铬合金有高的电阻，低的电阻温度系数，极好的热电动势，广泛用作热电偶材料。由镍与铜、铁、锰等组成的蒙乃尔合金具有高的强度和极好的耐蚀性，主要用于电器、海船等制造中。

各种牌号的镍及镍合金加工产品的化学成分见表3.1.5-37。镍及镍合金板和带的机械性能见表3.1.5-38。镍及镍合金加工产品的特性和用途见表3.1.5-39。

表3.1.5-37 **加工镍及镍合金的组别、代号和主要化学成分**（摘自GB 5235—85）

组别	代号	主要化学成分（%）					杂质总和
		Ni+Co	Cu	Si	Mn	其它	（%）
纯镍	N2	≥99.98					≤0.02
	N4	≥99.9					≤0.1
	N6	≥99.5					≤0.5
	N8	≥99.0					≤1.0
	DN(电真空镍)	≥99.35		0.02～0.10		C：0.02～0.10，Mg：0.02～0.10	≤0.35
阳极镍	NY1	≥99.7					≤0.3
	NY2	≥99.4	0.01～0.1			O：0.03～0.3，S：0.002～0.01	≤0.6
	NY3	≥99.0					≤1.0
镍锰合金	NMn3	余量			2.3～3.3		≤1.5
	NMn5	余量			4.6～5.4		≤2.0
镍铜合金	NCu40-2-1	余量	38～42		1.25～2.25	Fe0.2～1.0	≤0.6
	NCu28-2.5-1.5	余量	27～29		1.2～1.8	Fe2.0～3.0	≤0.6
电子用镍合金	NMg0.1	≥99.6		Mg：0.07～0.15			≤0.4
	NSi0.19	≥99.4		Si：0.15～0.25			≤0.5
	NW4-0.15	余量		W：3～4，Ca：0.07～0.17			≤0.15
	NW4-0.1	余量		W：3～4，Zr：0.08～0.14			≤0.12
	NW4-0.07	余量		W：3.5～4.5，Mg：0.05～0.1			≤0.2
热电合金	NSi3	Ni余量		2～3	0.05～0.7	Co：0.05～0.06	—
	NCr10	Ni余量	Cr：9～10	0.05～0.6		Co：0.1～1.2	
镍钼合金	NS21* NS33* *YB 687-75	余量 余量	Mo：26～30 Mo：16～18 Cr：15～17	≤0.3 ≤0.7	≤1.0 ≤1.0	Fe：4～6 V：0.2～0.4 W：3～4.5 Fe：≤7	

表 3.1.5-38 常用加工镍及镍合金产品的机械性能

代　　号	半成品种类	尺　寸 (mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 $\delta_{10} \geq$ (%)	标 准 号
N 6	拉制棒材	直径 5～20 >20～30 >30～40	硬 (Y)	588 539 510	5 6 6	GB 4435—84
		直径 5～30 >30～40	软 (M)	392 343	30 30	
	挤制棒材	直径 32～50 >50～60	热挤 (R)	343 343	25 20	
	拉制管材	外径 6～40	软 (M) 硬 (Y)	373 520	35 5	GB 2882—81
N 2、N 4、N 6、DN	薄壁管材	外径 0.3～18	硬 (Y) 软 (M)	539 392	— 35	YB 758—78
N 6、(N 7)、N 8	拉制线材	直径 0.03～0.20 0.21～0.48 0.50～1.00 1.05～6.00	软 (M)	422 392 373 343	15① 20① 20① 25①	GB 3120—82
		直径 0.10～0.50 0.53～1.00 1.05～5.00	半硬 (Y_2)	785～981 687～834 539～687	— — —	
		直径 0.03～0.09 0.10～0.50 0.53～1.00 1.05～6.00	硬 (Y)	883～1324 834～1079 736～981 637～883	— — — —	
N 6、(N 7)、 NSi 0.19(NSi 0.2)、 NMg 0.1	热轧板材	厚度 5～20	热轧 (R)	392	15	GB 2054—80
	冷轧板材	厚度 0.5～10	软 (M) 半硬 (Y_2) 硬 (Y)	392 — 539	35 — 2	
	冷轧带材	厚度 0.05～1.2	软 (M) 硬 (Y)	392 539	30 2	GB 2072—80
DN、NSi 0.19、 NMg 0.1	拉制线材	直径 0.03～0.20 0.21～0.48 0.50～1.00 1.05～6.00	软 (M)	422 392 373 343	15① 20① 20① 25①	GB 3121—82
		直径 0.10～0.50 0.53～1.00 1.05～5.00	半硬 (Y_2)	785～981 687～854 539～687	— — —	
DN、NSi 0.9、 NMg 0.1	拉制线材	直径 0.03～0.09 0.10～0.50 0.53～1.00 1.05～6.00	硬 (Y)	883～1324 834～1079 736～981 637～883	— — — —	GB 3121—82

续上表

代　　号	半成品种类	尺　寸 (mm)	材料状态	抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (MPa)	伸长率 $\delta_{10} \geq$ (%)	标　准　号
NCu 28-2.5-1.5	拉制棒材	直径　5～15 >15～30 >30～40	硬　(Y)	667 637 588	4 6 6	GB 4435—84
		直径　5～20 >20～30	半硬　(Y_2)	588 539	10 12	
		直径　5～30 >30～40	软　(M)	441 441	20 20	
	挤制棒材	直径　32～60	热挤　(R)	392	25	
	热轧板材	厚度　5～20	热轧　(R)	441	20	GB 2054—80
	冷轧板材	厚度　0.5～10	软　(M) 半硬　(Y_2)	441 569	25 6.5	
	冷轧带材	厚度　0.05～1.2	软　(M) 半硬　(Y_2)	441 569	25 6.5	GB 2072—80
	拉制线材	直径　0.05～0.50	软　(M) 硬　(Y)	471 785～981	15① —	GB 3113—82
		直径>0.5～4.0	软　(M) 硬　(Y)	451 687～883	25① —	
		直径>4.0～6.0	软　(M) 硬　(Y)	441 637～834	30① —	
NCu 40-2-1	拉制棒材	直径　5～20 >20～30	硬　(Y)	647 588	4 5	GB 4435—84
		直径　5～30	软　(M)	392	25	
	挤制棒材	直径　32～50	热挤　(R)	实测	实测	
	拉制线材	直径　0.1～6.0	软　(M) 硬　(Y)	441 637	实测① 实测①	GB 3113—82
NCu 40-2-1 NCu 28-2.5-1.5	拉制管材	外径　6～40	软　(M) 硬　(Y)	441 637	20 2	GB 2882—81
	薄壁管材	外径　0.3～18 壁厚　0.05～0.90	硬　(Y) 半硬(Y_2) 软　(M)	588 539 441	— 6 20	YB 758—78

① δ (l_0=100 mm) %，带括号的代号，按 GB 5235—85 已经废除。

表 3.1.5-39　　镍和镍合金加工产品的特性和用途

组　别	代　　号	主　要　特　性	用　途　举　例
纯镍	N 2、N 4、N 6、N 8	机械性能和加工性能好，耐蚀性优良，是耐热浓碱溶液腐蚀最好材料，耐中性和微酸性溶液及有机溶剂，在大气、水和海水中稳定，但不耐氧化性酸和高温含硫气体的腐蚀，无毒、且耐果酸	机械、化工设备耐蚀结构件，精密仪器结构件，电真空仪器零件，医疗器械及食品器皿等
	DN	同上，但有高的电真空性能	电子阴极管等
阳极镍	NY 1、NY 2、NY 3	电解镍，质地纯净，且有去钝化作用（因加入硫）	用于电镀镍槽中作阳极用
镍硅合金	NSi 0.19	具有高的电真空性能，耐腐蚀性好	无线电真空管阴极芯子和电工仪表零件
	NSi 3	在 600～1250℃ 范围内有足够大的热电势与电势率，抗蚀性好	热电偶负极材料
镍镁合金	NMg 0.1	有高的电真空性能，耐蚀性好	无线电真空管阴极芯子
镍锰合金	NMn 3、NMn 5	在温度较高的含硫气氛中的耐蚀性比纯镍高，热稳定性和电阻率也比纯镍高	内燃机火花塞电极、电工仪表零件
镍铜合金	NCu 40-2-1	耐蚀性高，无磁性	抗磁性零件
	NCu 28-2.5-1.5（蒙乃尔合金）	耐蚀性与镍和铜相似，但在一般情况下更优越些，特别是对氢氟酸的耐蚀性非常好。合金强度比镍高，而且具有良好的加工工艺性能；耐高温性能好，在 750℃ 以下的大气中是稳定的，在 500℃ 时还有足够高的强度	高强度、高耐蚀零件，高压充油电缆，供油槽、加热设备和医疗器械零件
镍铬合金	NCr 10	在 0 ～1200℃ 温度范围内有足够大的热电势与热电势率，且电阻率高，抗腐蚀性好	热电偶正极和高电阻仪器
镍钨合金	NW 4-0.15 NW 4-0.1		氧化物阴极芯及其它零件
镍钼合金	NS 21（哈氏合金 B）	在非氧化性的无机酸、碱和有机酸中有高的耐蚀性，特别是对沸点下一切浓度的盐酸都有良好的耐蚀性，但在氧化性介质（如硝酸）中不稳定，工艺性能好，可以在 650℃ 的高温条件下使用	这类合金价格都较昂贵，只用于腐蚀严重，而其它廉价材料不适用的场合中
	NS 33（哈氏合金 C）	能耐氧化性酸如硝酸、混酸、或铬酸与硫酸的混合物等的腐蚀，也耐氧化性盐类或含其它氧化剂的环境的腐蚀，对海水的抗力非常好，但在盐酸中则不如合金 B 耐蚀，加工工艺性能好，可以在 650℃ 的高温条件下使用	

6 硬质合金

硬质合金是由一种或多种难熔金属的碳化物（如 WC、TiC、TaC、NbC 等），以钴或镍作胶结剂，用粉末冶金方法制造出来的合金材料。它的特点是具有很高的红硬性，在 850～1000℃的高温下，仍能保持良好的切削性能；用它制成的刀具可采用比高速钢高 4～10 倍的切削速度。此外，硬质合金还具有高硬度、高耐磨性、抗蚀性好、膨胀系数低等优良性能，因此，也适用于制造模具和耐磨零件。

我国生产的硬质合金按成分和用途分为以下 5 类：

1)钨钴类　它是由 WC 和 Co 所组成，有较好的强度和韧性，能承受较大的冲击载荷和振动，但耐磨性较差，适于制造有色金属及其合金、脆性材料（铸铁）的加工刀具和要求一定冲击韧性的模具、工具和耐磨零件。

2)钨钛钴类　它是在钨钴合金的基础上加入适量的 TiC 所组成。加入 TiC 的目的是为了提高它的红硬性和与钢的粘结温度、减小摩擦系数，并略微提高其硬度。故其性能特点是：比钨钴合金有更高的红硬性、硬度和耐磨性，在切削钢一类塑性材料时不易发生粘刀现象，但加入 TiC 后，合金的抗弯强度和韧性降低。因此，它适于制造钢材的切削加工刀具。

3)通用硬质合金　它是在钨钛钴合金的基础上加入 TaC、NbC 组成的硬质合金。加入 TaC 和 NbC 的目的，在于改善合金的高温抗压强度、细化晶粒、减小过热倾向。其性能特点是：耐磨性和红硬性较高，能承受一定的冲击负荷，兼有上述两类硬质合金的优点，既能切削铸铁，又能切削钢材，特别适合于切削难加工材料（如耐热钢、不锈钢、高速钢、可锻铸铁、球墨铸铁和合金铸铁等等），故有通用硬质合金之称。但是，其价格较高，在加工一般铸铁时，其效果并不比钨钴类硬质合金好，因此，其实际应用范围较窄。

4)碳化钛镍钼硬质合金　它是以碳化钛为主要组成，以镍、钼作粘结剂而制成的硬质合金。其特点是：由于高硬度的碳化钛含量高，其耐磨性是硬质合金中最好的；用镍、钼代替钴作粘结剂，降低了成本。这种合金的缺点是：韧性低、焊接性差，只能用作可换式机械夹固式刀具使用。我国生产的 YN 10 牌号属此类合金，适用于碳钢、合金钢、工具钢、淬火钢等连续切削加工，对于尺寸较大的工件和表面粗糙度要求较高的工件，精加工效果尤为显著。

5)钢结硬质合金　它是以钢为粘结剂，以 WC、TiC 等为硬质相，用粉末冶金方法制成。它具有硬质合金和工具钢的双重特性，可以进行退火和各种强化热处理。退火后可以进行一般的切削加工、锻造和焊接，经强韧化处理后具有高的强度和韧性，又有类似硬质合金的高硬度和耐磨性。主要用于制造模具，对提高模具的使用寿命、生产效率和产品质量，对节约工模具钢、降低生产成本都有良好的效果。此外，它也可以应用于制造要求耐蚀、耐磨的零件。

按硬质相成分，钢结硬质合金可分为 WC 和 TiC 系列。基体成分多为镍、铬、钼合金工具钢或结构钢。

应当指出，近年来硬质合金的强韧化处理和表面处理（如渗硼）也日益活跃，对提高硬质合金的性能和使用寿命有良好的作用。

硬质合金的牌号、化学成分和性能见表 3.1.5-40。钢结硬质合金牌号、成分和性能及其使用特点和范围见表 3.1.5-41 和表 3.1.5-42。

表 3.1.5-40 **硬质合金的牌号、化学成分和物理机械性能**

类别	合金牌号	化学成分（%） WC	TiC	TaC (NbC)	Co	物理机械性能指标 相对密度	抗弯强度 σ_{bb} (MPa)	硬度 HRA	参考性能数据 冲击值 a_k (J/cm²)	导热率 λ J/(cm·s·℃)	0～300℃线胀系数 $\alpha\times10^{-6}$ (mm/mm·℃)	抗拉强度 σ_{bc} (MPa)
钨钴合金	YG 3 X	96.5		<0.5	3	15.0～15.3	>1100	91.5		0.88	4.1	
	YG 6 X	93.5		<0.5	6	14.6～15.0	>1400	91.0		0.80	4.4	
	YG 6 A	92.0		2	6	14.6～15.0	>1400	91.5				
	YG 6	94.0			6	14.6～15.0	>1450	89.5	2.6	0.80	4.5	4600
	YG 8 N	91.0		1	8	14.5～14.9	>1500	89.5				
	YG 8	92.0			8	14.5～14.9	>1500	89.0	2.5	0.75	4.5	4470
	YG 4 C	96.0			4	14.9～15.2	>1450	89.5				
	YG 8 C	92.0			8	14.5～14.9	>1750	88.0	3	0.75	4.8	3900
	YG 11 C	89.0			11	14.0～14.4	>2100	86.5	3.8	0.67		
	YG 15	85.0			15	13.0～14.2	>2100	87.0	4	0.59	5.3	3660
钨钛钴合金	YT 5	85.0	5		10	12.5～13.2	>1400	89.5		0.63	6.06	4600
	YT 14	78.0	14		8	11.2～12.0	>1200	90.5	0.7	0.34	6.21	4200
	YT 30	66.0	30		4	9.3～9.7	>900	92.5	0.3	0.21		
钨钛钽（铌）钴合金（通用合金）	YW 1	84～85	6	3～4	6	12.6～13.5	>1200	91.5				
	YW 2	82～83	6	3～4	8	12.4～13.5	>1350	90.5				
碳化钛镍钼合金	YN 10	15	62	1	Mo-10 Ni-12	>6.30	>1100	92.0				

表 3.1.5-41 **钢结硬质合金的牌号、成分和性能**

类型	牌号	成分（%） 硬质相 WC	TiC	基体	性能 硬度 (g/cm³)	硬度 HRC 退火	淬火回火	抗弯强度 (MPa)	冲击韧性 (J/cm²)
WC系列	GW 50 (YE 50)	50	—	1.1 Cr-0.3 Mo-0.3 Ni-0.8 C-Fe	10.3～10.6	35～42	68～72	2300～2800	12
	TLMW 50	50	—	1.25 Cr-1.25 Mo-1.0 C-Fe	10.21～10.37	35～40	66～68	≥2000	≥8
	TMW 50	50	—	2 Mo-1 C-Fe	≥10.20	35～40	63	1770～2150	7～10
	TW 50	50 50	— —	1.0 C-Fe 2.5 Cr-2.5 Mo-1 C-Fe	>10.20 10.2～10.4	38～42	66～68	1830 ≥2000	11.2 ≥8
	GW 50	50	—	1 Cr-1 Mo-0.3 C-Fe	≥10.20	35～42	67～70	≥1800	≥1.2
TiC 系列	GT 35 (YE 65)	—	35	3 Cr-3 Mo-0.9 C-Fe	6.4～6.6	39～46	67～69	1300～2300	5～8
	R 5	—	35	13 Cr-3 Mo-0.9 Cu-0.7 VFe-Fe	6.36～6.46	46～50	70	1300	3
	ST 60	—	60	奥氏体不锈钢	5.8～5.84		70	1540	2.6～4
	D-1	—	30	6 W-5 Mo-4 Cr-2 V-Fe	6.66～6.76	46	70	>1400	3～5
	GT 33	—	33	3 Cr-3 Mo-0.9 C-3 VFe-2.2 NbC-Fe	6.4～6.6	38～45	67～70	1400	4
	G	—	35	高速钢		40～43	69～73	1500～1900	

表 3.1.5-42　　钢结硬质合金使用特点和应用范围

牌号名称	使用特点	应用范围
YE 65(GT 35) YE 50(GW 50)	可热处理、可机械加工，不耐热	各种冷冲模、冷锻模、拉伸模及耐磨零件
ST 60(奥氏体不锈钢钢结硬质合金)	铬镍不锈钢作粘结成分，不能热处理，可机械加工	主要作抗氧化、耐腐蚀及耐热模具
D-1、G(高速钢钢结硬质合金)	可热处理，可机械加工。抗氧化、耐腐蚀、热硬性好	主要作切削刀具，特别是形状复杂的刀具

第 6 章 轮机零件的典型失效形式和分析

1 零件的失效

1.1 失效定义

机械构件在工作过程中，应完成设计所指定的机械效能。当机械构件发生下列情况之一时，该机械构件被定义为失效：

（1）完全失去机械效能而不能工作。

（2）虽然仍能工作，但已不能正常地完成设计所指定的机械效能。

（3）严重的损伤，使其在继续使用中失去了可靠性和安全性，需立即从工作过程中拆换或修理。

1.2 失效分类

零件的失效形式很多，主要取决于加载方式、应力应变状态、加载速度、载荷谱、工作温度和环境介质，零件的结构、形状以及尺寸等因素。从零件的机械效能上的失效来分类，有下列 3 类：

（1）过量变形失效　零件发生超过设计所允许的弹性变形或塑性变形量，使零件几何形状和尺寸发生过量的变化而引起失效。

（2）表面损伤失效　零件的工作表面因受到机械的、物理的以及化学的单独或联合作用而损伤，导致零件失去表面尺寸精度和几何形状精度而失效。

（3）断裂失效　零件的开裂式破断、使零件完全失去机械效能而不能工作。

1.3 典型失效形式

轮机零件发生失效的原因多种多样，因此同一零件会有不同的失效形式。此外，由于一个零件的各部位工作条件不同，在一个零件上可能存在不同的失效形式。轮机零件典型失效形式见表 3.1.6-1

表 3.1.6-1　　典型失效形式及举例

失效种类	失效形式	举　例
过量变形	弯曲	连杆螺栓、活塞销、中间轴、曲轴
	扭曲	曲轴过量弹性扭曲变形、螺旋桨轴过量弹性扭转变形
	拉长	连杆螺栓塑性拉长，缸盖螺栓塑性拉长
	胀大	喷油嘴芯、高压油泵柱塞相变胀大
	蠕变	废气蜗轮叶片高温蠕变伸长，排气阀阀面蠕变
表面损伤	磨损	各轴颈、曲柄销、轴瓦、凸轮、挺杆、活塞环、气缸套内表面
	接触疲劳	齿轮、凸轮、挺杆、轴瓦、柱塞泵、进气阀阀面
	腐蚀	气缸盖受热面、排气阀面
	穴蚀	气缸套外侧面、轴瓦、油泵、螺旋桨叶片

失效种类	失效形式	举例
断裂	一次加载断裂	齿轮断齿、紧固螺栓拉断、螺栓桨碰断
	疲劳断裂	曲轴弯曲扭转疲劳断裂，活塞销弯曲疲劳断裂．连杆拉压疲劳断裂、缸盖和活塞顶热疲劳断裂，气阀弹簧扭转疲劳断裂
	蠕变断裂	废气蜗轮叶片蠕变断裂，活塞顶、气缸盖火力面高温蠕变开裂
	环境致裂	螺旋桨轴应力腐蚀断裂，桨叶腐蚀疲劳断裂

1.4 曲轴失效形式

曲轴的典型失效形式为主轴颈和连杆轴颈磨损和弯曲疲劳、扭转疲劳导致的断裂。一般裂纹起源于有严重应力集中的圆角和油孔处。曲轴疲劳破坏形式及原因见表 3.1.6-2。

表 3.1.6-2　　曲轴疲劳破坏形式及原因

破坏形式	简图	破坏原因
从曲柄销或主轴颈油孔开始的扭转疲劳裂纹		油孔边缘太尖、表面粗糙度太高，淬火裂纹。热处理引起应力集中过深切削刀痕
从油孔开始的扭转疲劳转变为横断曲臂的裂纹		曲柄臂厚度不够．过度的磨损使圆角变小
从曲柄销内孔边缘开始的扭转疲劳裂纹		曲柄臂过分的斜削，曲柄内孔边缘过分尖税造成应力集中，热处理裂纹
从曲柄或主轴颈圆角开始的扭转疲劳纹		圆角半径过小，淬硬层被磨削掉，表面淬火不当造成圆角处有残余拉应力
从曲柄或主轴颈油孔开始沿一个方向的扭转疲劳裂		交变应力小于平均应力，或交变应力与平均应力等于疲劳极限，锻造或热处理产生的缺陷，组织差别，过分磨损
从圆角开始不通过油孔的只沿一个方向的扭转疲劳裂纹		交变应力小于平均应力，或交变应力与平均应力等于疲劳极限，锻造或热处理产生的缺陷，组织差别，过分磨损
围绕曲柄销或主轴颈圆角发展的扭转疲劳纹		由于圆角半径太小，或者加工刀痕过深造成很大应力集中
从曲柄销或主轴颈开始的弯曲疲劳裂纹		曲臂太薄，圆角半径太小，轴颈的不均匀磨损

1.5 气缸盖的破坏形式

气缸盖由于存在一个温差幅度大，极不均匀的以及交变的温度场，因此受到热应力的周

期作用。由于气缸中燃气的爆发压力，使缸盖受到脉冲应力作用。燃气和冷却水都是含有腐蚀成分的介质，虽然它们的腐蚀性较低，但在拉应力的联合作用下，成为促使裂纹形成和扩展、加速损坏的因素。因此气缸盖有其特殊的破坏形式，见表 3.1.6-3

表 3.1.6-3 气缸盖的破坏形式

失效形式	形貌特征	失效原因
气缸盖火力面上网状裂纹	裂纹呈无规则的网状位置在火力面上，排气阀之间，或喷油器与排气阀之间	材料抗高温蠕变强度不够，冷却温度不够而形成的拉伸热应力。
从缸盖冷却水一侧的表面向燃烧室一侧贯穿的机械疲劳裂纹	裂纹起源于冷却水一侧垂直于气缸底面，断口上可见到贝纹线，一般为一条裂纹，在起源区的部位可见到陈旧性的呈黑色的裂纹面	冷却水一侧有铸造裂纹或热处理裂纹，表面脱碳引起表面强度下降，在燃气爆发力的机械作用，周期作用导致弯曲疲劳断裂
从气缸盖冷却水一侧表面向燃烧室一侧延伸腐蚀疲劳裂纹	裂纹起源于冷却水一侧，裂纹口张开，一般有数条裂纹，垂直于底面，断口上见不到贝纹线而有腐蚀的色斑	冷却水中存在过量的SO_4^{2-}和Cl^-等腐蚀性离子，水温又过高，促使电化学作用活泼，在周期弯曲拉应力的联合作用下产生的腐蚀疲劳裂纹
裂纹连接缸盖底面阀孔和喷油孔一次性断裂	裂纹从冷却水一侧开始，断口呈脆性形貌特征，平齐有光泽	铸造中存在粗大的魏氏组织，又没有充分消除铸造应力，导致新缸盖弯曲断裂

1.6 轴瓦的失效形式

轴瓦和轴为一对摩擦副。轴瓦的主要失效形式为磨损、接触疲劳、腐蚀和穴蚀。这些都属于表面损伤类的失效。这些形式的失效，一般在轴瓦工作过程中同时发生，可从轴瓦的损伤形貌特征上区分开来，见表 3.1.6-4。

表 3.1.6-4 轴瓦的失效形式

形式	形貌特征	失效原因
划伤擦伤	轴瓦工作表面沿旋转方向出现沟槽或很细密的刻划痕	装配时不清洁带入硬质粒子，或润滑油不清洁含有硬质粒子
磨粒磨损	轴瓦工作表面的主要承载区大面积地出现沿旋转方向的极细微的磨痕，油孔和油槽附近冲刷磨痕	润滑油中有极细的硬粒子，轴上磨下来的细硬粒子，润滑油的流速过高、冲刷力太大
粘着磨损	轴瓦上均匀分布不规则形状的小凹坑，轴瓦合金从间隙两侧挤出，严重时出现咬合和咬死	润滑不良使轴与轴瓦之间没有形成油膜而使轴瓦合金熔化或超载
疲劳剥落	轴瓦上有许多麻点，形如虫蛀孔，严重时可见到大块剥落凹坑，也可见到极细的疲劳裂纹	轴瓦合金承载能力不够，过载和高速，轴承装配间隙过大，轴瓦合金夹杂物过多
腐蚀疲劳	轴瓦上有针状麻痕，点状或水滴状的斑痕	润滑油中渗进海水，防冻剂泄漏入润滑油，添加剂中含硫量过高，润滑油老化
穴蚀	轴瓦表面有不规则形状的剥落呈点状、滴状、条状和树枝状，常对称分布油孔周围或油槽两侧	润滑油中含有水分，空气，轴瓦载荷波动幅度太大，轴瓦强度不够

1.7 气缸套失效形式

气缸套是在高温高压，润滑条件差的情况下，受到高速往复磨损，这种磨损失效表现在缸套内径尺寸的变化。气缸套的冷却水一侧常有穴蚀，穴蚀使缸套局部表面损伤。缸套磨损失效形式见表 3.1.6-5。

表 3.1.6-5　　　　　　　　　　　　　　　　**气缸套失效形式**

失效形式	胶粘咬死	正常磨损	磨料磨损	粘着磨损	腐蚀磨损	穴　　蚀
磨损分布情况	上止点 下止点					
磨损原因	表面突起部分粘着和熔化引起拉缸，当粘着的面积较大时胶粘咬死，拉缸后，在缸壁上粗糙不平，有一些突起会再次发生拉缸或咬死	由于上下止点处的活塞环运动速度为零，油膜不易形成，使摩擦处于边界状态。上止点又处于高温高压区，所以磨损更大	从上部吸入的灰尘，积炭成为磨料，所以上止点磨损大。机油从下部飞溅到缸套上，油中所带的硬质粒子成为磨料，所以下止点磨损也大	上止点由于润滑条件差，处于高温高压区，使直接接触金属熔化、粘着、剥落，所以磨损突出，有时会出现拉缸现象	上止点受燃气中高硫分气腐蚀，腐蚀剥落的金属碎片在气缸中部形成严重的磨料磨损，固此中部磨损很突出	在缸套冷却水一侧，活塞最大侧推力一边，由于活塞的横向摆动，撞击缸套引起缸壁高频振动产生蜂窝状的凹坑

2　轮机零件的断裂失效及分析

断裂是零件最严重的失效，常常使零部件，甚至整台机器失去效能而无法继续工作。如曲轴、连杆等断裂会引起整台柴油机的失效，严重时会导致海难事故。

2.1　断裂失效种类

常见的断裂失效种类是根据断裂性质，断面与载荷的取向，裂纹扩展的途径以及断裂微观机制划分的。

2.1.1　按断裂性质分类

1)韧性断裂　断裂前发生明显塑性变形的断裂。韧性断裂的试样外形、断口形貌的特征见表 3.1.6-6。

工程上，一般把光滑试样在单向静拉伸下，拉断后的断面收缩率 $\psi_k \geq 5\%$ 时，称为韧性断裂，发生韧性断裂的材料称为韧性材料。

$$\psi_k = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \tag{3.1.6-1}$$

式中：ψ_k——断面收缩率；

F_0——原始截面积；

F_K——断口处截面积。

表 3.1.6 6　　　　　　　　　　韧性断裂特征

特征＼方式	拉伸	扭转	压缩	冲击弯曲
断口				
外形	杯锥状断口	垂直或平行于扭转轴断开	沿与压力方向成 45°角断裂	垂直于弯曲轴线断开
断口形貌				
特征	断口中心部有沿拉伸轴方向拉长的纤维区，纤维区周围有放射线区边缘有与拉伸轴呈 45°的剪切唇	整个断口上有呈环状分布的纤维，纤维沿切应力方向拉长	断口上的纤维沿最大切应力方向分布	断口上的纤维大致平行于缺口，断口三个边缘有剪切唇
试样变形	有明显断面收缩或缩颈	有明显的残余扭转变形	试样高度减小直径增大呈鼓状	试样有明显的弯曲

2)脆性断裂　断裂前基本上没有发生塑性变形的断裂。脆性断裂的试样外形、断口的形貌特征见表 3.1.6-7。

工程上，一般把光滑试样在单向静拉伸下，拉断后的断面收缩率$\psi_k < 5\%$时，称为脆性断裂，发生脆性断裂的材料称为脆性材料。

脆性断裂，由于断裂前基本上不发生塑性变形，所以断裂是突然发生的，是一种最危险的失效形式。

金属材料出现脆性断裂，不仅是由于材料的塑性低，还常常由于缺口引起应力状态变硬(如三向拉应力状态)，或由于在低温下受到冲击载荷作用等。固此韧性材料在有缺口或受到低温下的冲击，也可能发生脆性断裂。

表 3.1.6-7　　　　　　　　　　脆性断裂特征

特征＼方式	拉　伸	扭　转	压　缩	弯　曲
断口外形	平齐，基本上与拉伸轴线垂直	与扭转轴轴基本上成 45° 交角	与最大正应变的垂直方向开裂	垂直于弯曲轴线
断口形貌特征	平坦，有放射线条纹。没有纤维区和剪切唇或很小。有时有闪光的小刻面	为粗糙的斜面，见不到纤维状花样	断口粗糙，从顶部看常常不止一个开裂面而有数个	断口上从开裂点向断口中心有放射线条纹，断面平齐
试样变形	没有缩颈，没有明显断面收缩	没有明显的残余扭转变形或很小	试样直径、高度和外形没明显变化	试样不见有弯曲角

3)疲劳断裂　在变动载荷作用下，经过较长时间而发生的断裂。疲劳断裂是在低应力下发生，即变动载荷的最大应力远远低于材料的断裂强度和强度极限，甚至低于材料的屈服强度。无论是脆性材料或韧性材料，发生疲劳断裂前都没有明显的塑性变形，断裂是突然发生的。

根据载荷的性质和环境介质条件，疲劳断裂又可分为高周疲劳断裂、低周疲劳断裂、热疲劳断裂、腐蚀疲劳断裂和接触疲劳表面损伤。

(1)高周疲劳断裂　交变载荷的最大应力低于材料的屈服强度，交变频率高，经过较高的交变周次（$>10^5$次）后疲劳断裂。

(2)低周疲劳断裂　交变载荷的最大应力接近或略高于材料的屈服强度，交变频率较低，经过较低的交变周次（小于 10^5次）后疲劳断裂。

(3)热疲劳断裂　在交变的热应力周期作用下引起的疲劳断裂。

热应力是由于温度分布不均匀，又随时间变化，同时膨胀与收缩受到限制而引起的。

(4)腐蚀疲劳断裂　环境中含有金属材料敏感的腐蚀介质，虽然浓度不高，但在腐蚀和交变应力的联合作用下发生的断裂。

金属材料由于受到腐蚀作用，加速了裂纹形成与扩展，因此使材料抵抗疲劳的能力明显地下降。

(5)接触疲劳　在接触应力重复地长期作用下，引起的接触表面剥落。

接触应力是在点接触或线接触表面上受到压力作用而产生的。表面在接触应力反复地长期作用下剥落过程属于疲劳破坏的机制，剥落仅仅发生在局部表面损伤。

4)环境介质促进断裂　金属材料工作环境中，有金属材料敏感的浸蚀介质，使金属工作即使低于屈服强度下，也发生缓慢断裂。

这种断裂最常见有应力腐蚀断裂、氢脆、碱脆和辐射脆裂。

（1）应力腐蚀断裂　金属材料在拉伸应力和腐蚀的联合作用下引起的低应力缓慢断裂。

应力腐蚀必须具备两个条件：一个条件为环境中有金属材料敏感的腐蚀介质，如表3.1.6-8所列。这些介质的腐蚀性很弱，以致如果没有应力作用时，即使长期工作也不会因腐蚀而发生断裂。号一个条件是必须有拉应力作用，拉应力很低，以致如果没有腐蚀的促进作用时，即使长期工作也不会因拉应力作用而断裂。只有两个条件同时具备，在联合作用下才发生断裂。

拉应力来自外力作用，也可能是铸造、锻造、焊接、热处理和装配所引起的残余拉应力。

表3.1.6-8　**金属材料敏感的腐蚀介质**

材料	腐　蚀　介　质
碳钢	荷性钠溶液，含氯溶液，硝酸盐水液、海水、硫化氢溶液、海洋大气、严重污染的大气
含铬钢	氯化物溶液、硫化氢溶液、潮湿空气、海水、海洋大气、污染的大气
铬镍钢	氯化物溶液、酸性钠盐溶液、水蒸气、硫化氢溶液、海水
铜合金	水蒸气、湿硫化氢、氨溶液
铝合金	湿空气、盐水、海洋大气、海水

（2）氢脆　由于受到含氢气氛的作用而引起的脆断。

金属在冶炼、锻造、电镀、焊接、发蓝或酸洗过程中吸收了过量的氢而造成脆断称为内部氢脆。由于工作环境中含氢气氛吸附和渗入而造成的脆断称为环境氢脆。

通常只有合金钢对氢脆敏感，尤其是高强度钢对氢脆很敏感。

5)蠕变断裂　金属材料在恒温、恒应力的长期作用下，产生缓慢的塑性变形，最后导致断裂。

工程上常见的为高温蠕变断裂，这是由于金属在高温时晶界强度明显下降，以致低于晶内强度，于是在低应力长期作用下发生断裂。

2.1.2　断裂的其它分类

断裂的其它分类见表3.1.6-9。

表3.1.6-9　**其他断裂分类及特征**

分类方法	名　称	断裂示意图	特　征
根据断裂面的取向	正断		断裂面的取向垂直于最大正应力
	切断		断裂面的取向平行于最大切应力

续上表

分类方法	名　　称	断裂示意图	特　　　　征
根据裂纹扩展所取的途径	穿晶断裂		裂纹穿过晶粒内部
	沿晶断裂		裂纹沿着晶界
根据断裂微观机制	解理断裂		沿解理面分离，穿晶断裂
	微孔		沿晶界聚合，沿晶断裂
	聚型断裂		沿晶聚合，穿晶断裂
	纯剪切断裂		通过缩颈导致最终切断

表 3.1.6-10　　断口宏观分析依据、形貌特征、分析结论

依据	特　　　征	结　　　论　　　（举　　例）
断口的光泽	全部断口呈灰暗色	钢的韧性断口或灰铸铁断口
	光照下断口上有闪光小刻面	钢的脆性断口，并且可能为解理型
	局部有摩擦发光区	可能是疲劳裂纹的裂纹源区
	断口部分区域有氧化色	黑色：在高温加热时，如铸造、锻造淬火加热、焊接时造成的裂纹 蓝色：在中温加热时，如中温回火时发生的裂纹，或者在淬火时发生的裂纹
	断口有腐蚀色	在腐蚀介质联合作用断裂，或断裂前已有裂纹存在，而受到介质的腐蚀
	断口上有油污色	断裂前已有裂纹存在，在工作中受到润滑油等污染。或在润滑油浸泡下缓慢断
断口结构粗细	断口上有纤维状颗粒结构，粗糙结构	可能为韧性断裂，纤维细长则材料的塑性好，有纤维说明存在微孔型断裂机制
	断口上有结晶状，颗粒结构	可能为脆性断裂，结晶状结构占面积大则材料脆性大。大多数为解理型，也可能晶界被氧化或晶界聚集第二相造成沿晶脆断
	断口呈很细瓷状的结构	低应力脆断，或材料晶粒非常细。这种结构多数为穿晶断裂
断口宏观花样	放射线状花样	放射花样说明裂纹快速扩展，射线指向裂纹源、放射线细密、所占面积比例大则反映材料脆性断裂倾向大
	人字形状花样	这是放射线花样在板状结构件断口上的变异花样，也是快速扩展特征花样。无缺口时人字指向裂纹源、有缺口则反之
断口宏观花样	贝纹线（或海滩线、休止线）	疲劳断口的特有特征花样，有贝纹线区为裂纹稳定扩展区。贝纹线包围裂纹源区。贝纹线间距可用来估算裂纹扩展速率
	木纹花样	不正常的断口，由于材料中有过多的硫杂质，在锻压、轧制后形成层状结构、断裂沿层展开

依据	特　征	结　论　（举　例）
宏观①	断面垂直于最大正应力或最大正应变方向	正断型断裂，可能为脆性断裂、疲劳断裂或应力腐蚀断裂
断面	断面平行于最大切应力方向	一般为韧性断裂，切断型断裂，或处于平面应力状态的断裂
取向	断口部分垂直于最大正应力，另部分平行于最大切应力方向	复合型断裂，主要在一次扭转断裂中出现或扭转疲劳，也常常在具有层状结构的轧材中出现
断口	断口处有明显的，塑性变形	如缩颈、扭转痕迹、弯曲、局部变粗等，一般属于韧性断裂或蠕变断裂
外形	断口平齐、能很好并合	一般为脆性断裂、疲劳断裂
和边缘	断口有剪切唇	处于平面应力状态下，快速撕裂。剪切唇所占断口面积比例大，则韧性断裂倾向大
	断口边缘呈锯齿状	多数由于应力集中的缺口、台阶、圆角造成的反复扭转断裂

① 不同加载方式的正断或切断判别见表 3.1.6-11。

2.2 金属断口宏观分析的目的和依据

断口宏观分析是用肉眼、放大镜或低倍率光学显微镜，进行断口分析一种方法，可以在零件破断的现伤进行。宏观分析的分辨能力受到人的肉眼局限，一般为 0.2 mm，细微结构无法分析，但是其视野大，可以对断口全部进行观察分析，只要细心，不会遗漏断口上的信息，因此它是断口分析中最基本也是最主要的分析方法。

表 3.1.6-11　　不同加载方式下的正断和切断

加载方式		应力方向		断裂方式	
		Smax	τmax	正断	切断
拉伸					
压缩					
剪切					
扭转					
纯弯曲					
切弯曲					
压入					

注：切弯曲为同时受到剪切和弯曲载荷。

2.2.1 宏观分析的目的

断口宏观分析一般可以对下列 7 项作出定性或定量的结论:

(1)断裂的性质。(2)断裂源的位置。(3)裂纹扩展方向或估计扩展速率。(4)零件应力集中的程度。(5)材料的大致强度水平和载荷性质。(6)材质情况和有否缺陷。(7)环境介质和工作温度情况。

2.2.2 宏观分析的依据

金属断口宏观分析主要依据为断口的形貌,包括断口外形、断口色泽、断口粗糙程度、裂纹的走向、断裂面相对于外力的位向、断裂面上的花纹、断口边缘情况等。表 3.1.6-10 列出主要的分析依据和特征,以及由这些特征可能得到的分析结论。

2.3 韧性断口的宏观分析

金属零件在发生韧性断裂前,宏观上有明显的塑性变形,因此金属内部也有足够的塑性变形。由于金属塑性变形的主要机制是切应力作用下,原子面之间的滑移,于是在韧性断裂的断口上,留下了以滑移为主要机制的塑性变形痕迹。

最为典型的韧性断口为韧性材料在单向静拉伸时的断口。

2.3.1 圆试样拉伸韧性断口分析

静拉伸断口反映了断口的基本特征,即断口的三要素:纤维区、放射区和剪切唇。轮机零件中,由一次静拉伸引起的断裂的情况很少。

1)断口宏观形貌特征 圆试样静拉伸韧性断口见图 3.1.6-1;断口的三个区的特征见图 3.1.6-2。

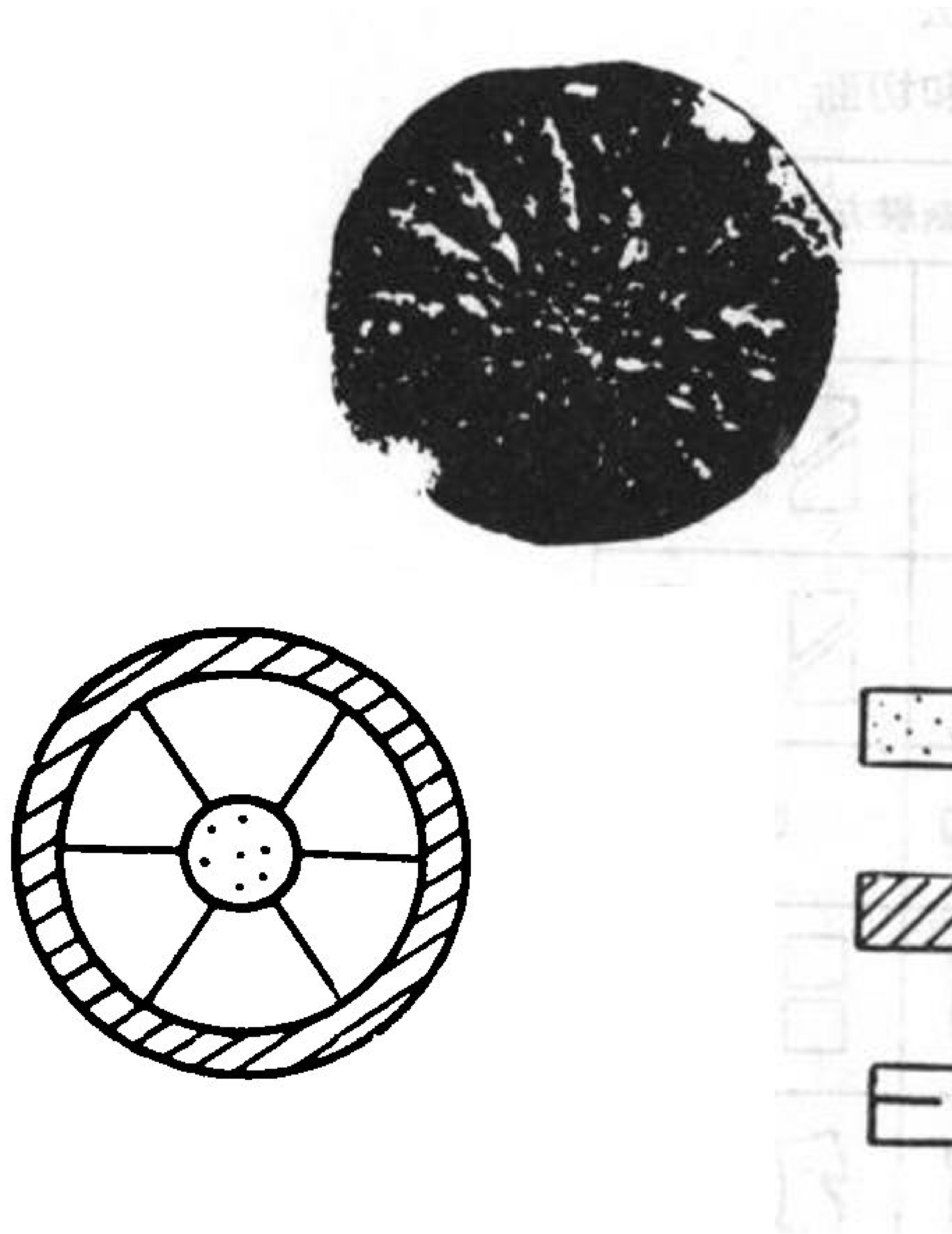


图 3.1.6-1 拉伸韧性断口照片

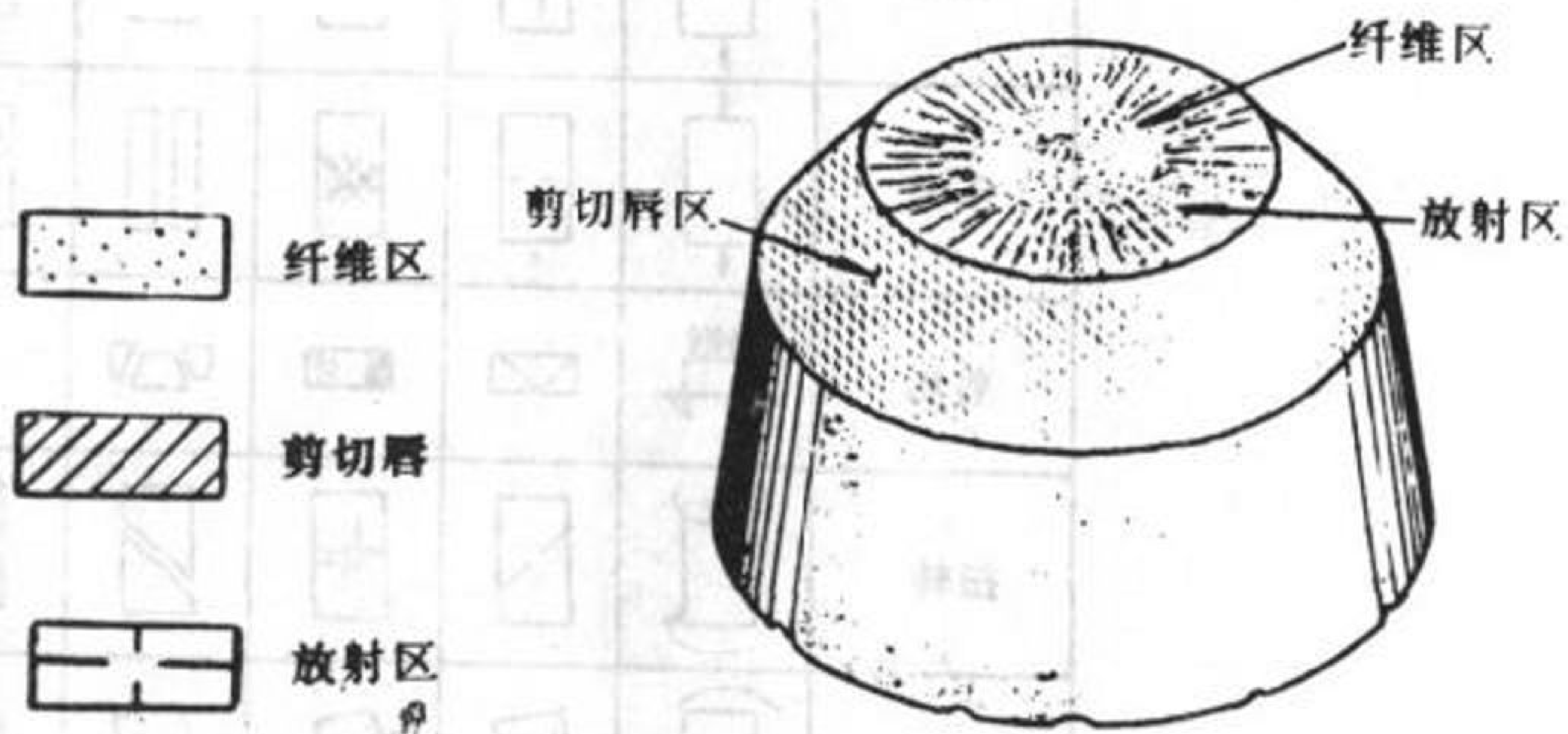


图 3.1.6-2 拉伸断口三个区的特征

(1)纤维区 位于断口中心,用肉眼可见纤维状形貌。纤维区为裂纹的发源地,纤维形貌是金属被剪切应力切断的痕迹。由于纤维吸收和散射光线,呈使该区呈灰暗色。

材料的塑性愈好,纤维显得愈长,并且纤维区的面积也略有增大。

(2)放射区 该区可见放射线状条纹,从中心的纤维区指向断口边缘,基本垂直于裂纹

的前沿轮廓线。放射线区为裂纹的快速扩展区，放射线条纹是径向切应力作用下，低能量撕裂的痕迹。

材料的塑性愈好，撕裂时塑性变形量愈大，放射线也相应粗大。相反，放射线细小，说明材料的塑性差。随材料的塑性降低，脆性增加、放射线随之变细小，以至消失。

（3）剪切唇区　位于断口的边缘，与拉伸轴大致呈 35°～45°交角，表面较平滑。剪切唇是在切向剪切应力作用下，快速切断造成的。一般在平面应力状态下发生，为切断型断裂。

2)断口三要素与材料性质关系　断口的纤维区、放射区和剪切唇所占面积的比例反映材料的塑性高低。塑性增高纤维区面积和剪切唇宽度加大、放射区减小。高塑性材料的拉伸断口仅有纤维区和较宽的剪切唇，没有放射区。高脆性材料的拉伸断口，仅有很小的纤维区，很大的放射区或没有放射线的平坦断面，而没有剪切唇。

2.3.2　矩形试样拉伸断口分析

矩形截面试样拉伸韧性断口形貌特征如图 3.1.6-3 所示。不同厚度的试样形貌不同。

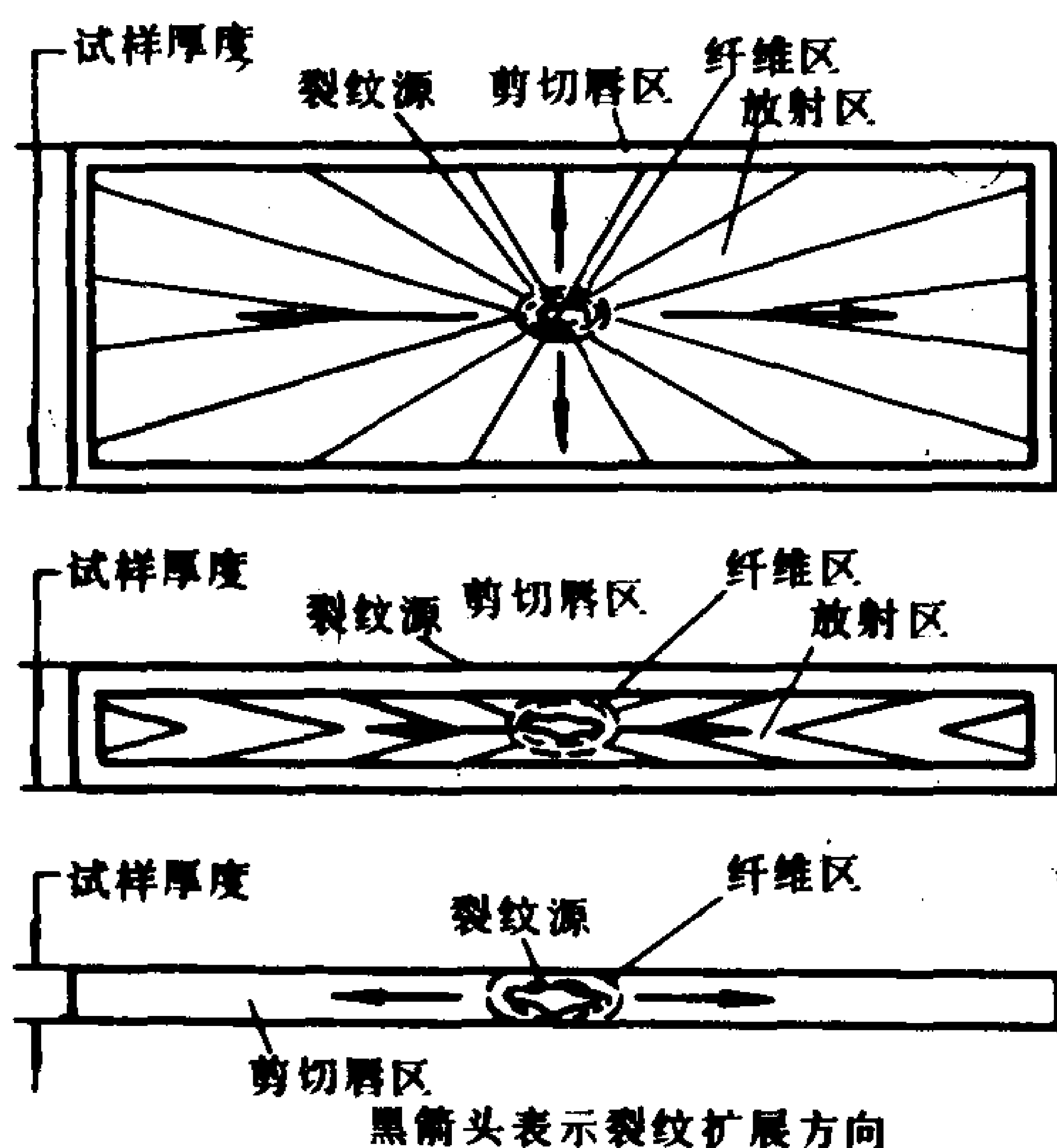


图 3.1.6-3　矩形截面试样拉伸韧性断口形貌特征

1)纤维区　在方形截面断口上为圆形，在长方形截面断口上为椭圆形，并随板厚变薄而变得扁平。

2)放射区　在方形截面断口上仍然存在，在长方形截面断口上变为人字形花样，人字形指向裂纹源区。当板厚薄到使整个截面都处于平面应力状态时，人字形花样消失，仅由纤维区和剪切唇组成。

3)剪切唇区　只要为韧性断裂，剪切唇区总在断口四周存在，很薄的板，可能只有剪切唇，实际上为剪切断裂的断口。

随材料塑性降低，断口上的纤维区减小，放射区增大，剪切唇宽度略有增加。

2.3.3　带缺口的试样拉伸断口分析

实际零件常有台阶、圆角、螺纹槽、油孔等尺寸或形状突变，这些突变部位在零件受力时产生应力集中和应变集中，并且还会局部改变应力状态，因此将影响断口的形貌，并且也可能改变断裂性质，即同一材料在无缺口的光滑试样拉伸时为韧性断裂，而带有缺口的试样拉伸时，可能变为脆性断裂。由于缺口引起的应力应变集中，应力状态改变为三向拉应力状态，断裂性质由韧性改为脆性等现象称为缺口效应。

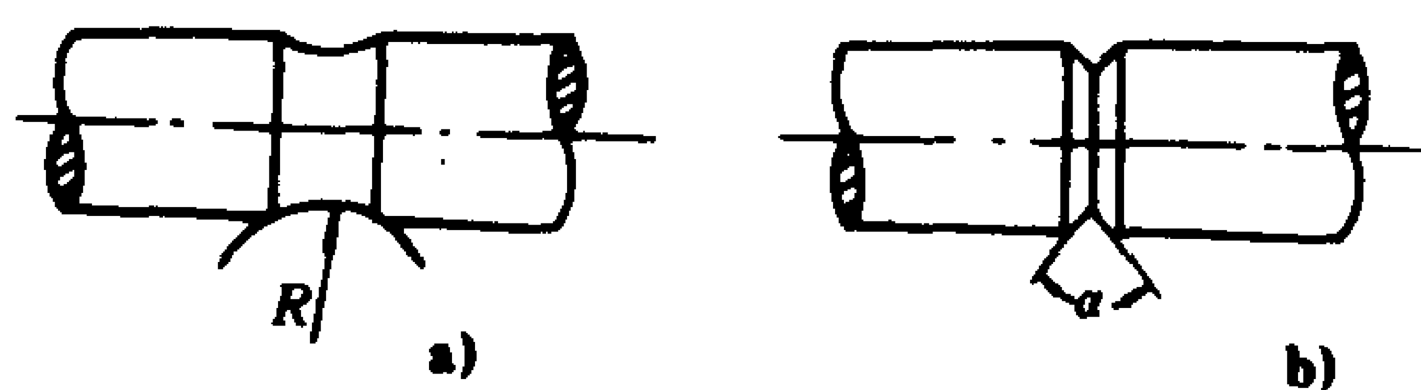


图 3.1.6-4　试样缺口示意图

a）钝缺口；　b）尖缺口

1)钝缺口试样拉伸断口分析

钝缺口如图 3.1.6-4 a)所示，缺口角大，圆角半径也大。

钝缺口在静拉伸时，韧性材料的裂纹仍然在试样中心形成，断口中心区仍然为纤维区。快速扩展的放射区也存在，但是剪切唇所占断口面积比例减少，宽度减薄。如果材料的塑性差时，可能使剪切唇消失，仅有纤维区和放射

区。

2)尖缺口试样拉伸断口分析

缺口很尖时，如图 3.1.6-4 b)所示，在受力时应力集中更为严重，缺口根部会首先开裂，成为裂纹源，裂纹由缺口向心部扩展，最后断裂区在试样中心，而纤维区在断口周围，放射区的射线指向心部的最后断裂区。尖缺口拉伸试样的材料塑性很低，缺口很尖锐时，可能看不到断口周围的纤维区，而只有放射区和最后断裂区。尖缺口拉伸缺口特征见图 3.1.6-5。

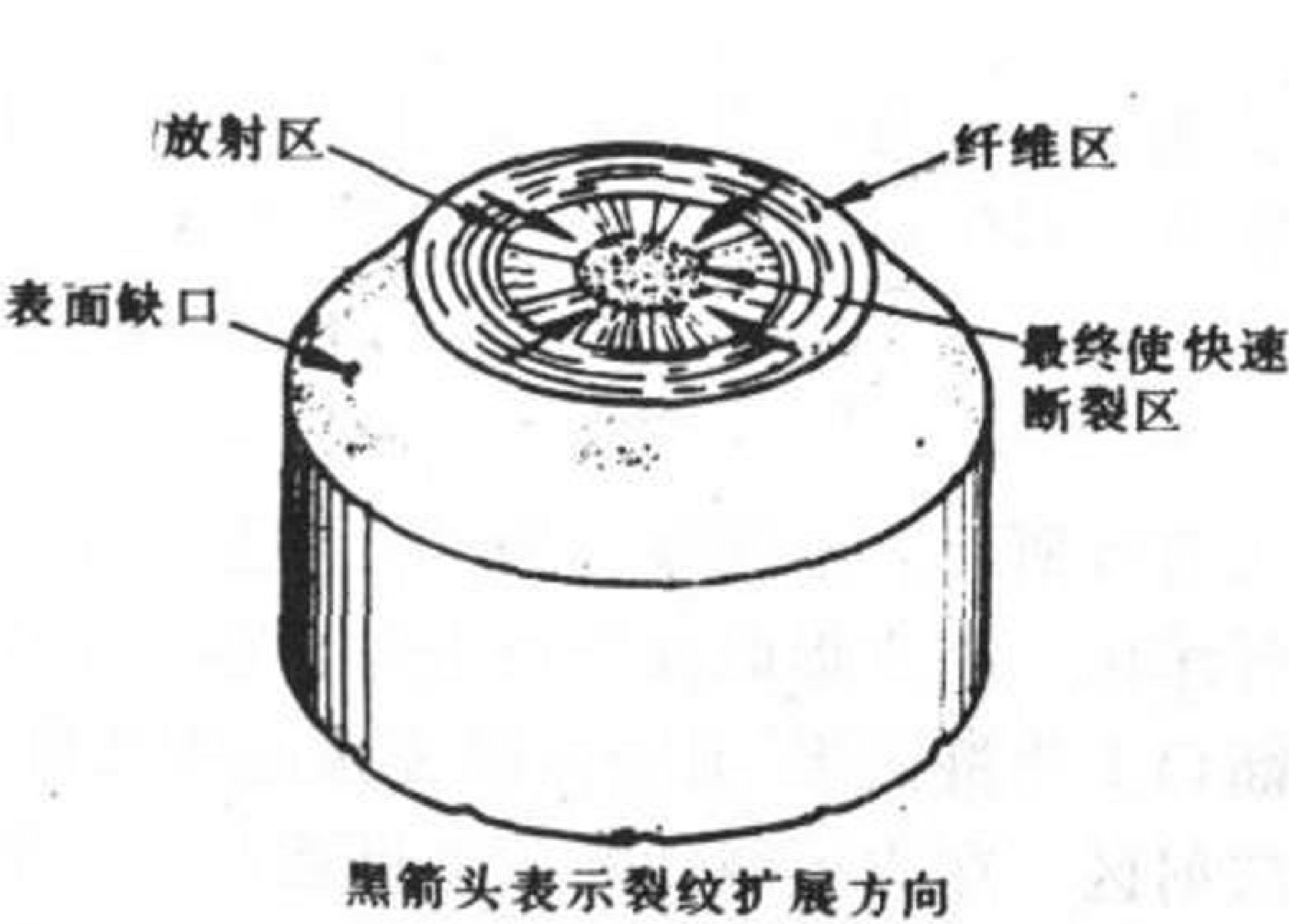


图 3.1.6-5　尖缺口拉伸试样韧性断口特征

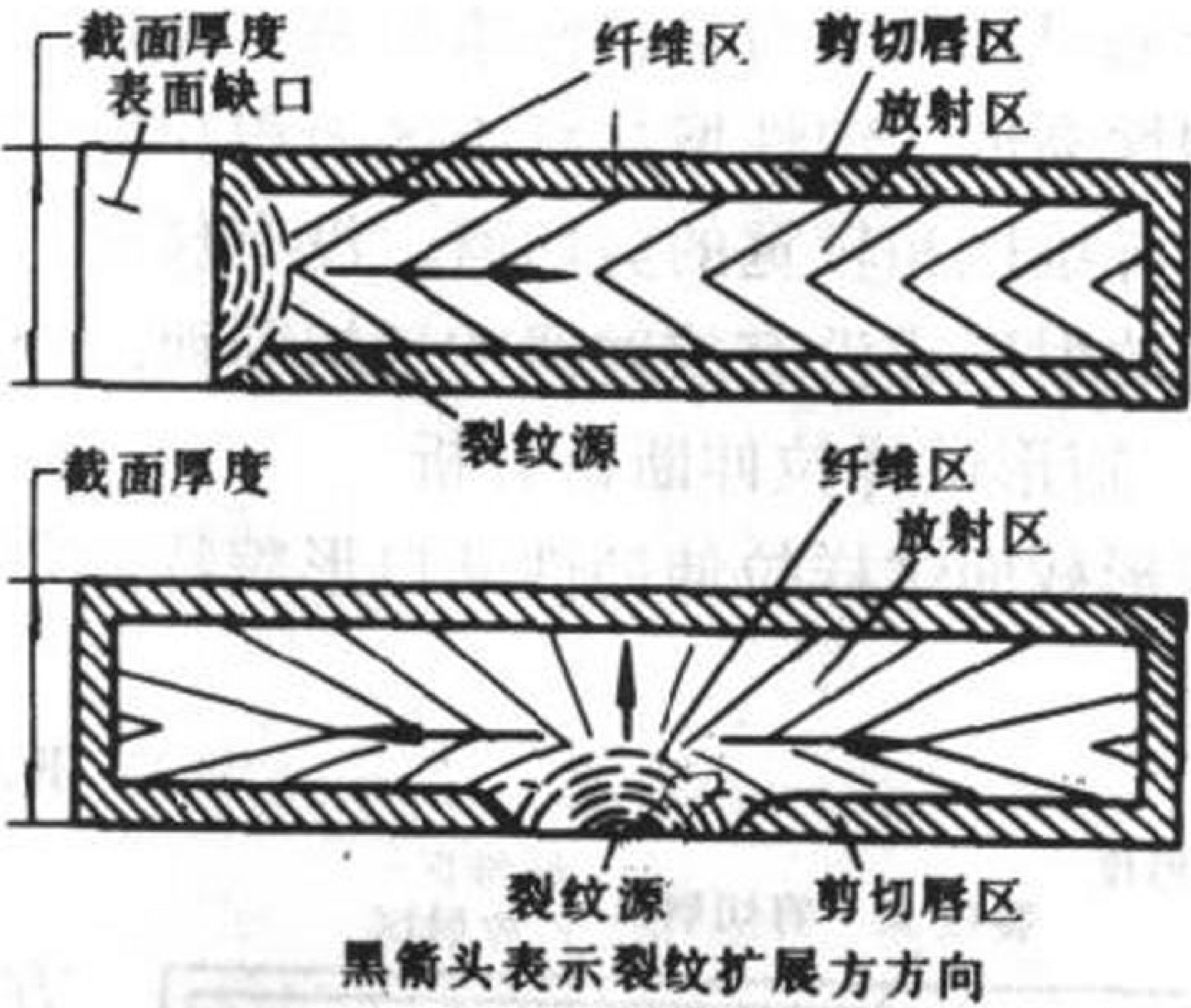


图 3.1.6-6　带缺口矩形截面试样韧性断口特征

3)带缺口矩形截面试样拉伸断口分析

这种断口仍然有三个区，如图 3.1.6-6 所示。当缺口在试样一侧，纤维区在缺口附近，人字形指向裂纹源，即纤维区。当缺口在截面的中间一侧，裂纹在缺口附近形成后向两边扩展，人字形指向中间的纤维区。剪切唇在断口周围。

当在板的长度方向两侧都有较尖的切口时，由于切口的应力集中，使裂纹沿切口扩展要比心部快，这种情况虽然也有人字形，但是人字形却不是指向裂纹源区而是背向裂纹源区，指向扩展方向。

2.3.4　影响韧性断口形貌的因素

表 9.1.6-12　　温度、材料性质和尺寸对断口三要素影响

影响因素 \ 三要素		纤维区	放射区	剪切唇
材料塑性降低		纤维面积减小		剪切唇略减小
		纤维变得粗短	放射线变细小	剪切唇消失
		纤维消失	放射线消失变平	
工作温度降低		纤维区面积减小	放射区面积增大	剪切唇减小
		纤维变得粗短	放射线变细小	剪切唇消失
		纤维消失	放射线消失	
试样尺寸	圆试样直径减小	纤维区面积略有减小	放射线区随尺寸减小	基本不变
	矩形试样厚度减薄	纤维区呈圆形	正方形为放射线	基本不变
		纤维区呈椭圆形	变成人字形并变尖	
		纤维区呈扁平	人字形消失	

韧性断口的纤维区、放射区（或人字形区）和剪切唇的形貌和所占面积比例会受到工作

温度、材料性质、试样尺寸的影响，见表 3.1.6-12。

2.4 脆性断口宏观分析

轮机零件脆性断裂常常是由于材料缺陷引起的，如淬火裂纹、加热中过热引起晶粒粗化，加热时产生的晶界氧化，夹杂物在晶界上呈链状或带状分布，合金的回火脆性，铸件缩孔和疏松等缺陷，石墨偏聚，锻造魏氏组织，晶界受到腐蚀，焊接内裂纹，碱脆，氢脆等等。

2.4.1 脆性断口一般宏观特征

脆性断口宏观上有以下特征：

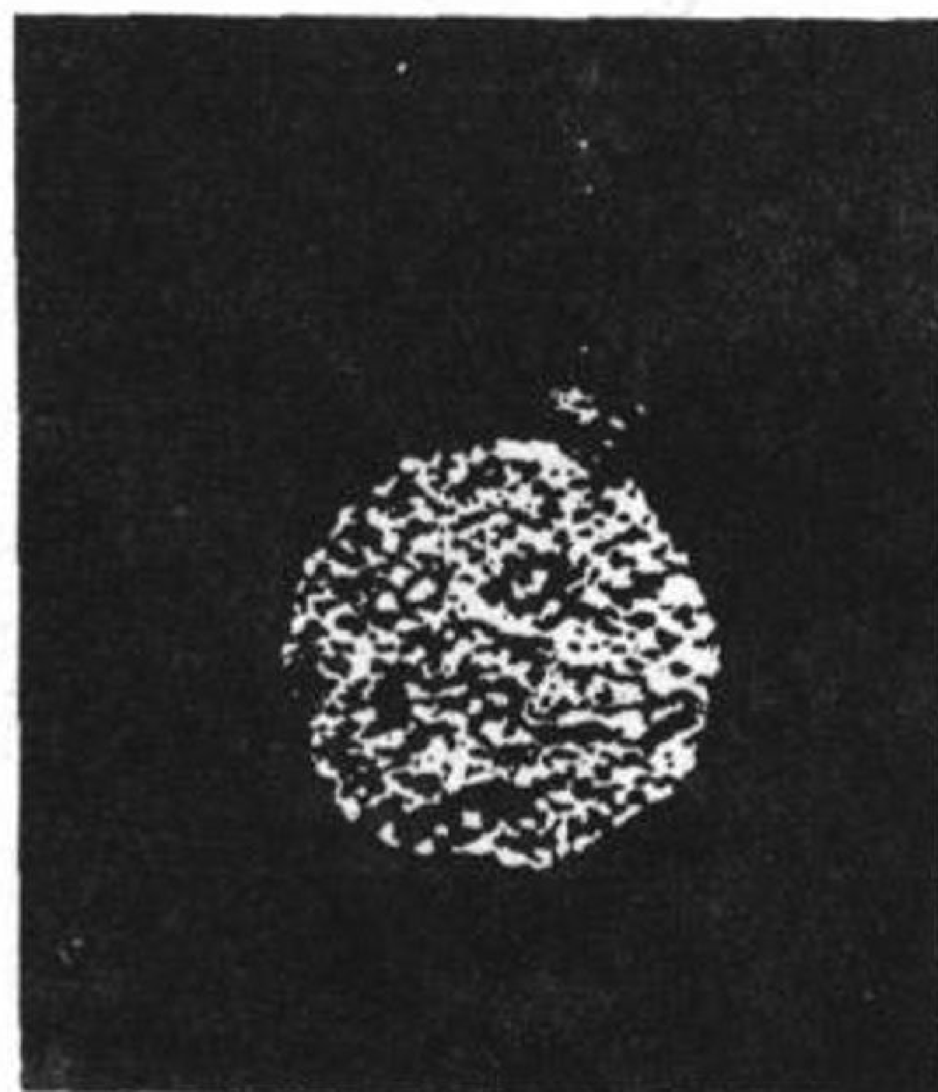


图 3.1.6-7 断口上的闪光小刻面



图 3.1.6-8 结构件的脆性断口

（1）断口处没有明显的塑性变形。

（2）断面一般与最大正应力或最大正应变方向垂直。

（3）断口边缘没有剪切唇。

（4）断口上的纤维区极少或没有。

（5）断口上有放射线，但很细小，或有人字形花样，并且人字形很尖。

（6）断口上有时可见闪光的小刻面（解理小平面），并且随脆性增加所占面积增大，见图 3.1.6-7。

（7）断口有时呈灰暗的无定型粗糙表面，这种断口多数为沿晶界开裂的脆断。

实际零件，尤其是结构件的脆性断面典型形貌为很尖的人字型花样，如图 3.1.6-8 所示。

2.4.2 脆性断裂先后顺序分析

零件发生脆断时有可能有多个碎片或多条裂纹，为了判断首先破坏的碎片或首先开裂的裂纹，以便寻找裂纹源，必须分析裂纹的扩展方向和断裂的先后顺序。常用的有下列方法：

（1）人字形法　断口上有人字形花样，如果零件没有缺口，则人字形指向裂纹源，如图 3.1.6-9 a）。当板材两侧有切口时，人字形指向裂纹扩展方向而背向裂纹源，见图3.1.6-9 b）。

（2）裂纹分枝法　当裂纹为树枝状时，开裂顺序为主干裂纹在先，枝裂纹在后，见图 3.1.6-9 c）

（3）T型法　当裂纹以T字型出现时，横裂纹在先，竖裂纹在后，见图 3.1.6-9 d）。

（4）裂纹开口法　当一条裂纹有开口时，开口一边先裂，见图 3.1.6-9 e）。

(5)三角形法　当矩形截面断口有平面又有斜面时，平面裂纹在先，斜面裂纹在后，见图 3.1.6-9 f)。

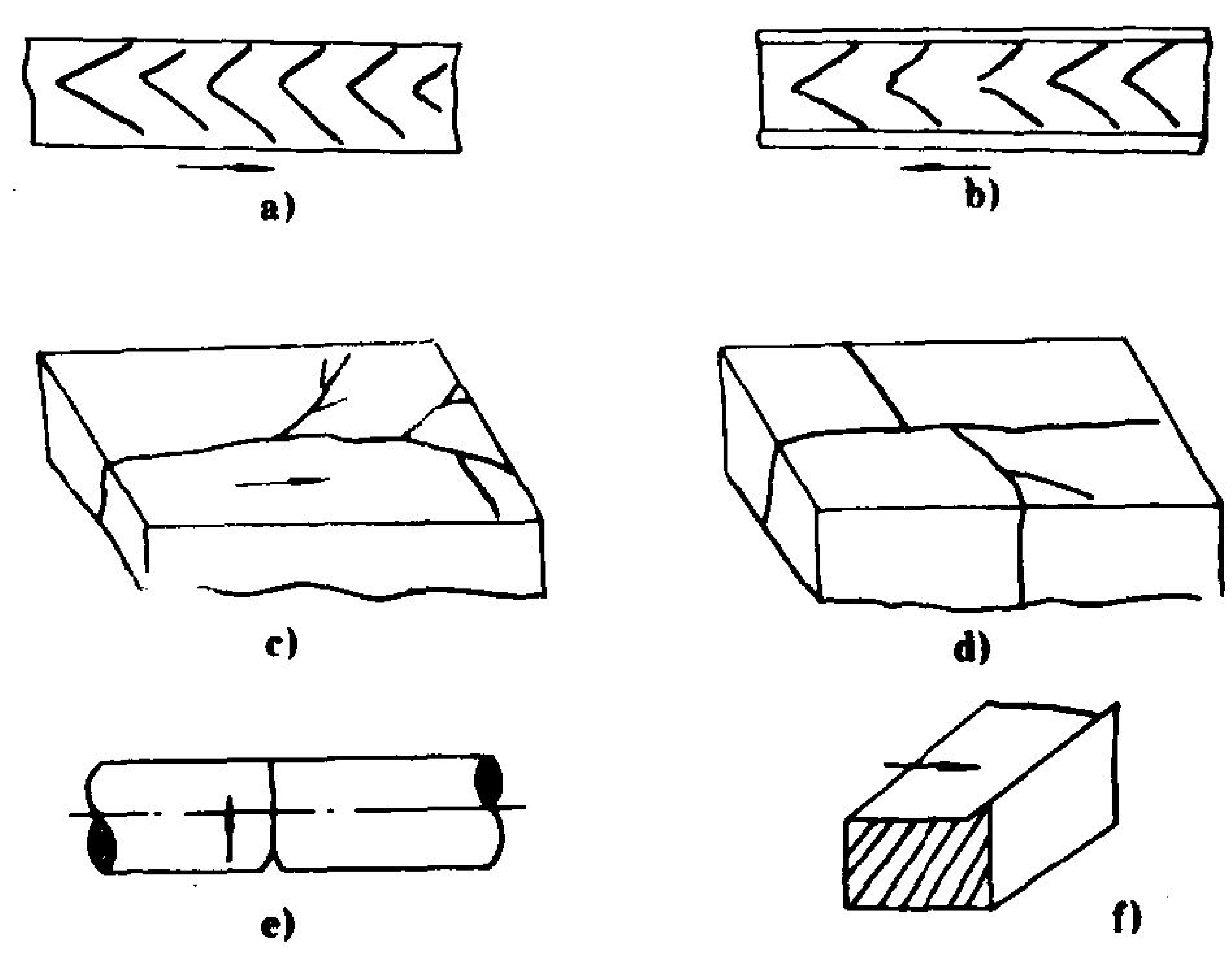


图 3.1.6-9　脆性断裂先后顺序示意图

2.5　疲劳断口宏观分析

疲劳断裂由裂纹形成，裂纹亚临界扩展和最后断裂三个阶段组成，其中亚临界扩展是不同于一次加载断裂时的裂纹扩展那样，在短时间内完成，而是在交变载荷周期作用下，逐步地扩展。因此，在疲劳断口上留有这种逐步扩展的痕迹，构成了断口的特有形貌，成为疲劳断口分析的主要依据。

2.5.1　疲劳断口的一般构成

疲劳断口的构成与疲劳断裂过程的三个阶段相对应：有裂纹源区，裂纹扩展区和最后断裂区。图 3.1.6-10 为疲劳断口，图 3.1.6-11 为疲劳断口的三个构成区的特征示意图。

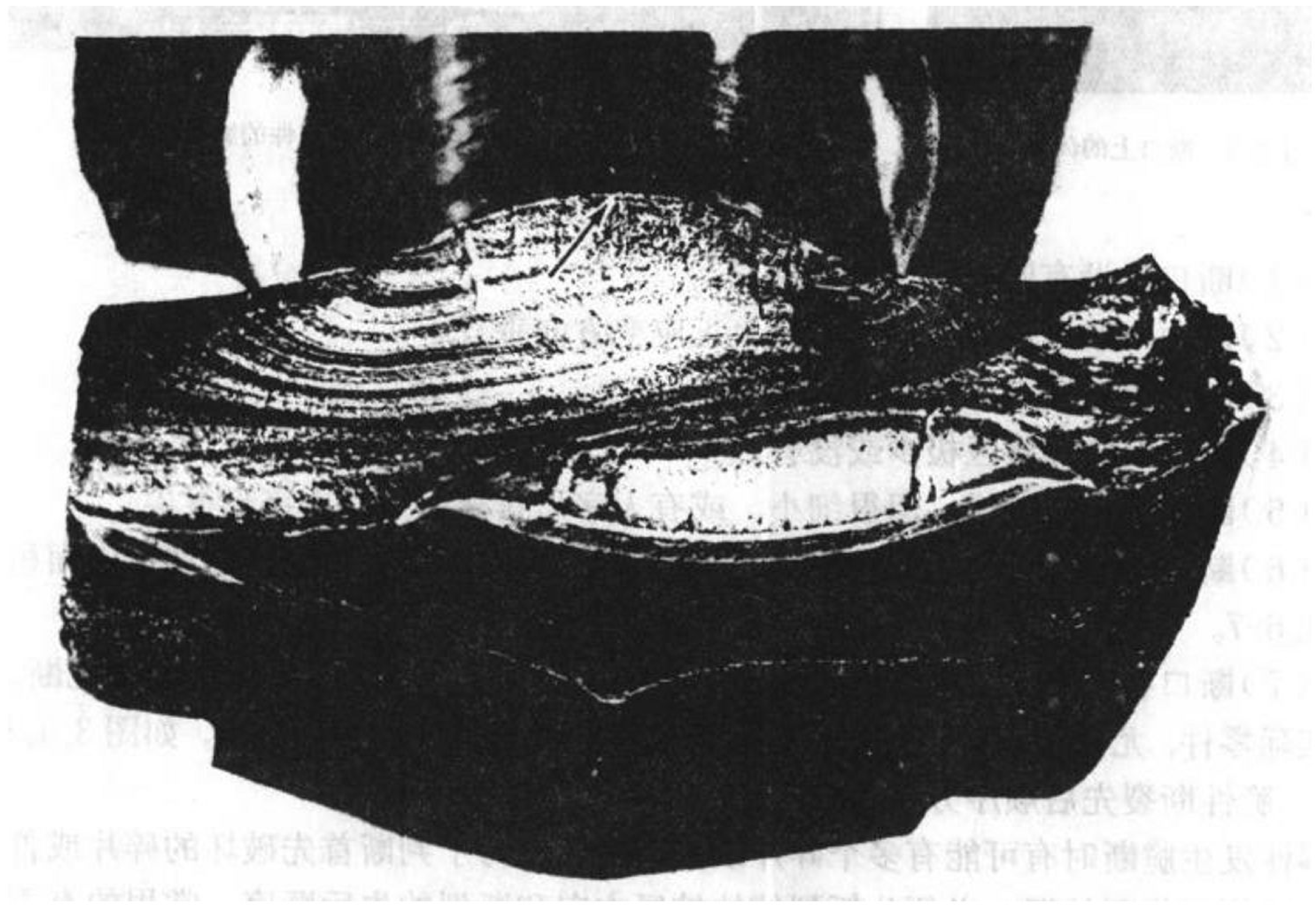


图 3.1.6-10　疲劳断口

1)裂纹源区

裂纹源区为疲劳裂纹的宏观起始位置，这个区中有裂纹的萌生点，通常萌生点有许多个。裂纹萌生后，达到一定的尺寸即开始扩展。由于开始扩展的速率很低，使裂纹源区的两侧裂

纹面反复摩擦而受到磨损，因此裂纹源区常常显得非常光亮平滑。

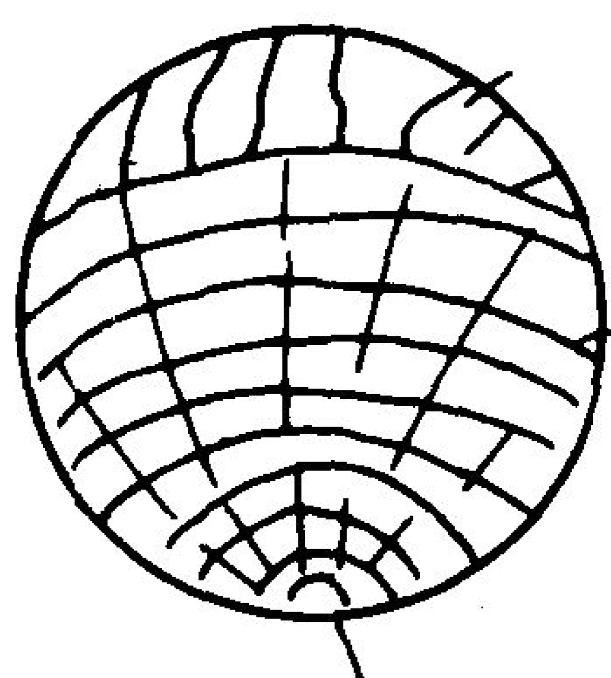


图 3.1.6-11　疲劳断口特征

裂纹源区附近有时可看到放射线痕迹，以裂纹源为中心向裂纹扩展方向辐射。这是由于各裂纹萌生点形成的裂纹在不同高度平面上扩展，系列扩展面在扩展中相互汇合形成交界线，交界线实质上是系列小台阶，于是形成放射线状花样。通常放射线非常细小。

2)裂纹扩展区

疲劳裂纹扩展过程中，由于外加载荷变化，残余应力变化，材料组织和缺陷等影响，使裂纹前沿的应力大小和应力状态发生改变，裂纹会不断地选择和改变方向，因此形成扩展区的孤形疲劳线（也称贝纹线、海滩线、休止线）。贝纹线是疲劳断口上最具特征性的花样，为宏观分析中认别疲劳断口的可靠的依据。

3)最后断裂区

随着裂纹逐步扩展，零件的承载面积不断减小，虽然外加载荷不变，但裂纹尖端应力场强度因子却随裂纹扩展不断增大，当应力场强度因子达到材料的断裂韧性Kc值时，裂纹失隐扩展而最后断裂，所以最后断裂一般属于脆性断裂。

以上三个区所占断口面积比例视载荷大小而变化，载荷大则扩展区相对变小而最后断区变大，裂纹源区是很小的，并且与裂纹扩展区没有明显的界线。

实际零件疲劳断口上不一定都有上述三个区的特征，如裂纹源区可能就是宏观的材料缺陷或原来存在的裂纹位置，贝纹线也常常由于材料因素或其它原因而消失。

2.5.2　疲劳断口的宏观特征

疲劳断口的宏观特征会因加载方式不同而变化，主要表现在三个区的相对位置和扩展区贝纹线的几何形状及最后断裂区的相对位置和形状变化。

1)弯曲疲劳断口宏观特征

图 3.1.6-12 为单向弯曲、双向弯曲和旋转弯曲疲劳断口宏观形貌特征。可见弯曲疲劳宏观形貌有下列特点：

载荷型式	试样的几何形状					
	无缺口		钝缺口		尖缺口	
	低载荷	高载荷	低载荷	高载荷	低载荷	高载荷
单向弯曲						
二向弯曲						
旋转弯曲						

图 3.1.6-12　弯曲疲劳断口各种形貌特征

（1）疲劳裂纹源在最大弯曲拉应力处。因此，单向弯曲只有一个疲劳源，双向弯曲有两个相对称位置上的裂纹源。旋转弯曲在无缺口时，也只有一个裂纹源，当有缺口时，有两个或多个裂纹源。

（2）贝纹线在没有缺口时，以疲劳源为中心呈弧形展开，当存在缺口时，由于边缘处的缺口应力集中，使裂纹在边缘扩展速度比心部快，使贝纹线随裂纹扩展由孤形逐渐变得扁平。如果缺口较尖锐时，贝纹线可能变成与裂纹源相反方向弯成孤线，以致包围最后断裂区。

（3）在单向弯曲和双向弯曲时，断口上的疲劳源在最后断裂区的对面位置。但是旋转弯

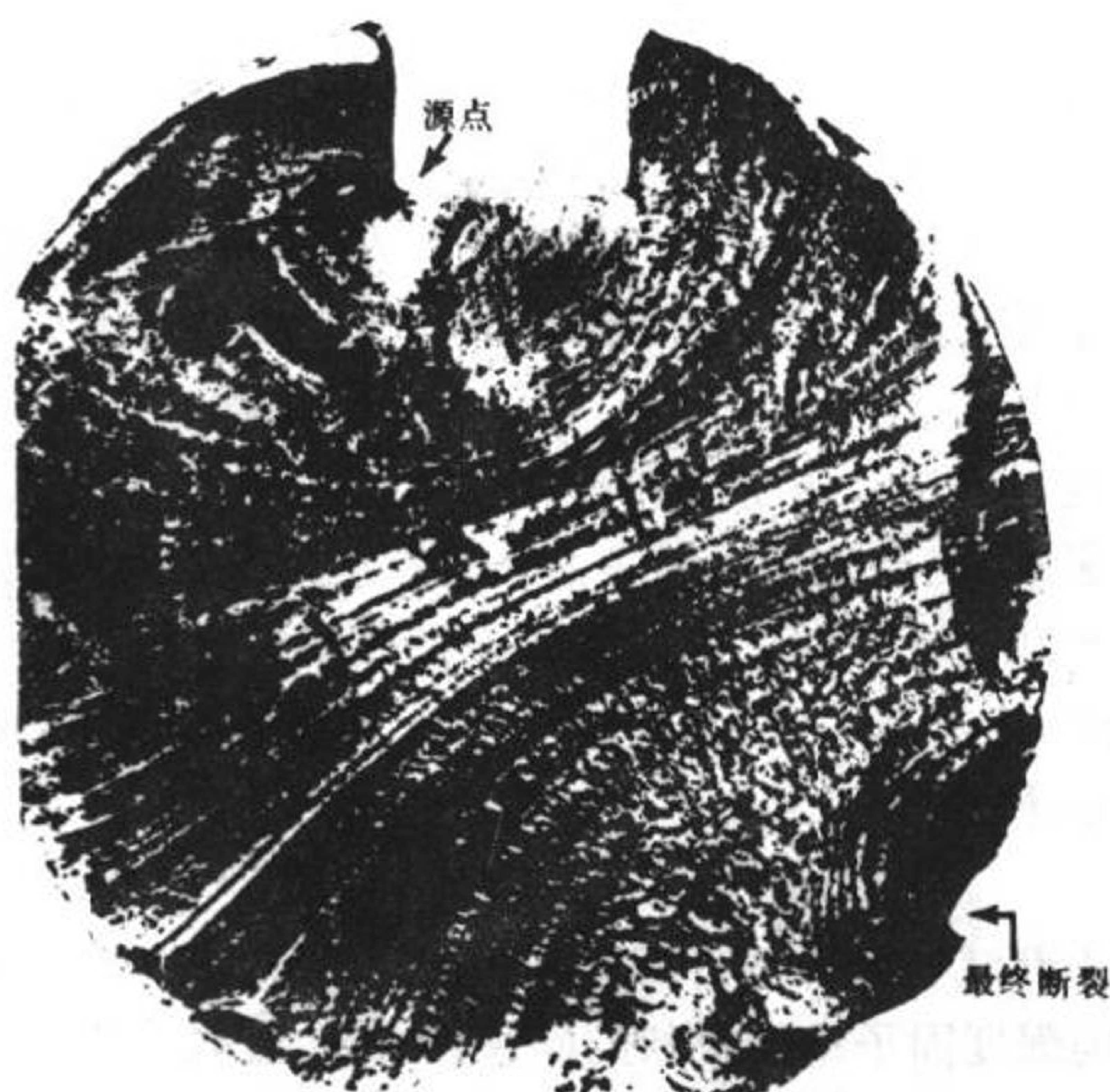




图 3.1.6-13　旋转弯曲疲劳最后断裂区的偏转

曲的最后断裂区相对于疲劳源有一个偏转角θ，偏转方向与旋转方向相反，如图 3.1.6-13 a）和b）所示。因此从断口上的疲劳源与最后断裂区的相对位置能推断出旋转方向。

（4）弯曲疲劳裂纹扩展方向垂直于拉伸应力线，对于光滑轴断口宏观表面基本上为垂直于弯曲中线的平面，如图 3.1.6-14 a）所示。当存在台阶时，由于应力集中，使应力线在台阶处弯曲，而疲劳裂纹扩展方向仍然垂直于应力线，所以裂纹走向不断改变，如图 3.1.6-14 b）所示，结果使断口宏观表面成为半球形。



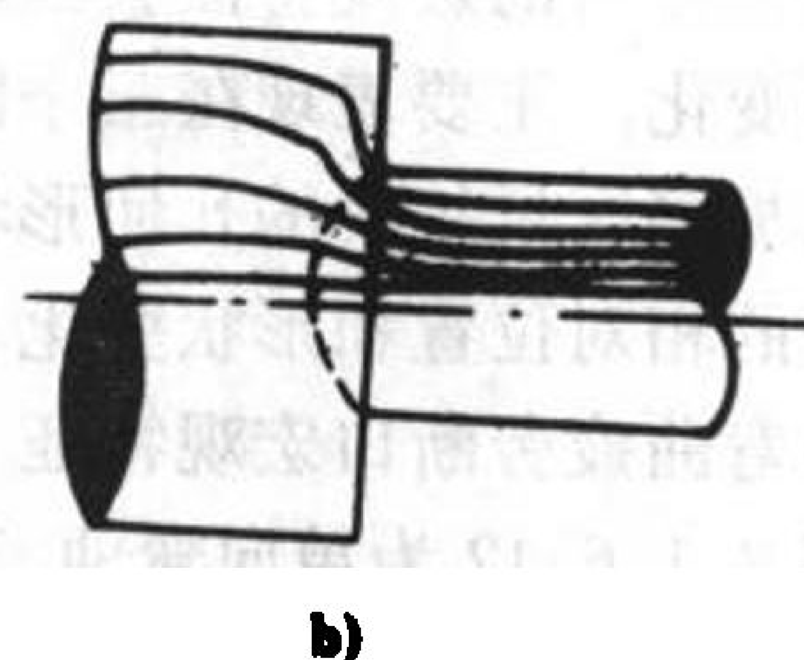


图 3.1.6-14　弯曲疲劳裂纹走向

a）裂纹垂直于弯曲中线；b）裂纹垂直于应力线

2）拉-拉，拉-压疲劳断口宏观特征轴向拉-拉或拉-压疲劳断口的各种宏观形貌特征如图 3.1.6-15。由于这种加载方式，承载面上应力分布均匀，因此疲劳裂纹源位置大多数出现在缺陷机率最高的表面，表面刀痕，表面脱碳、表面裂纹、表面损伤、表面腐蚀等都可能成为裂纹源。如果内部存在较大的材料缺陷时，缺陷也可能成为裂纹源。图 3.1.6-16 为锻造活塞杆拉压疲劳断口，裂纹起源于螺纹根部。

3）扭转疲劳断口宏观特征

扭转疲劳裂纹一般沿着最大拉应力垂直方向扩展，但在扭转疲劳断裂中，有可能沿着最大切应力平行方向扩展。因此扭转疲劳裂纹有三个类型：正断型，切断型和复合型断口，如图 3.1.6-17 所示。

图 3.1.6-18 所示为驱动轴反复扭转疲劳断口，可看到锯齿状边缘，这种形状的边缘实际是正断型的变异，它的每一个齿面与最大拉伸应力垂直。由于台阶造成应力集中，在反复扭转中，台阶根部产生了许多小裂纹，并且合并而成锯齿状。

高载荷			低载荷		
无缺口	钝缺口	尖缺口	无缺口	钝缺口	尖缺口
圆试样					
板试样　外缺口					
板试样　内缺口					
拉和拉－压载荷					
a	b	c	d	e	f
g	h	i	j	k	l
	m	n		o	p

图 3.1.6-15　拉压疲劳断口宏观特征

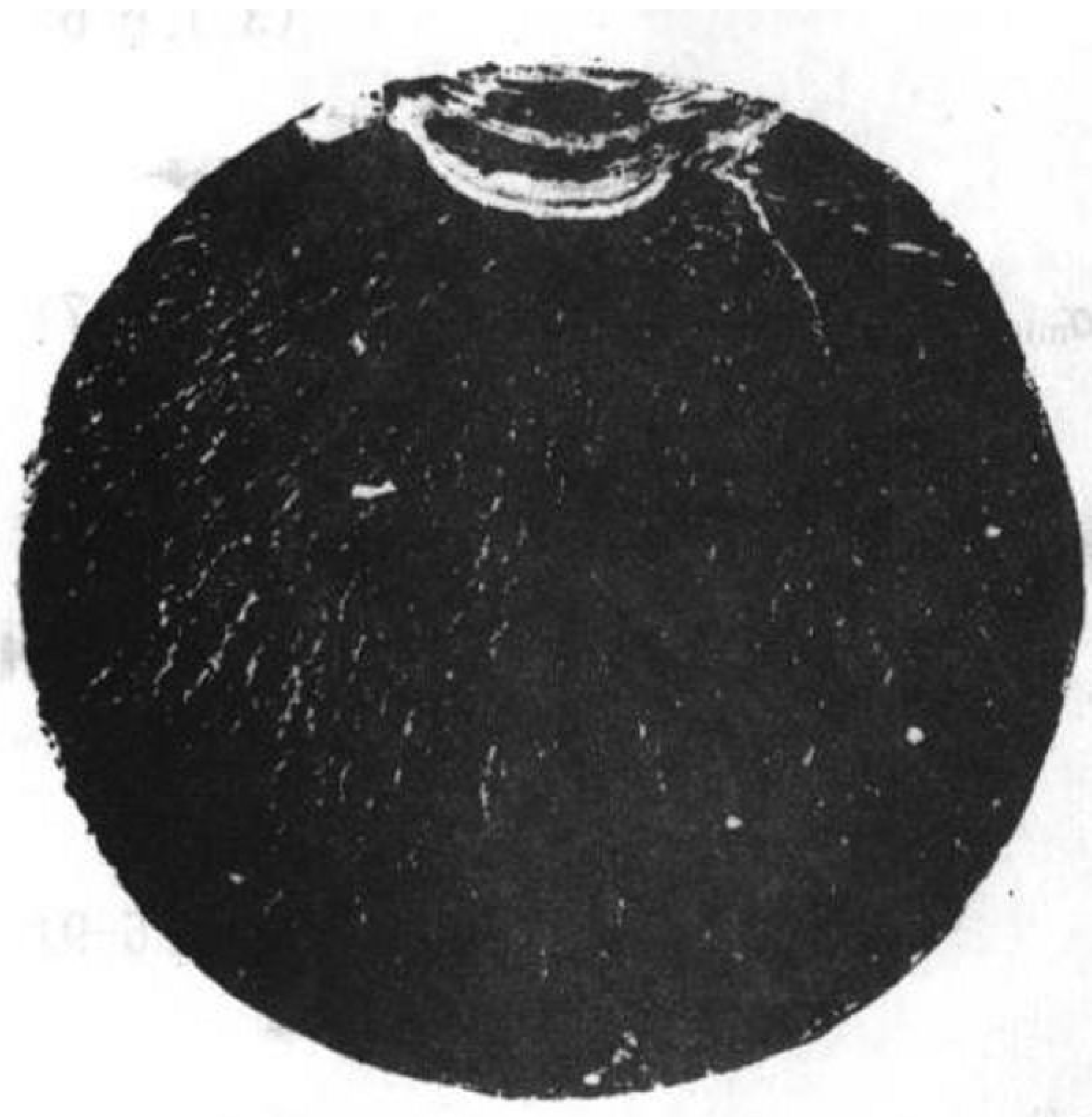


图 3.1.6-16　活塞杆拉压疲劳断口

扭转断裂的类型	基本型	变异型	
		1	2
（1）正断型	45°	45° 锯齿状	45° 星型
（2）剪断型		小台阶	大台阶
（3）复合型		45° 45°	45° 45°

图 3.1.6-17　扭转疲劳断口的各种类型

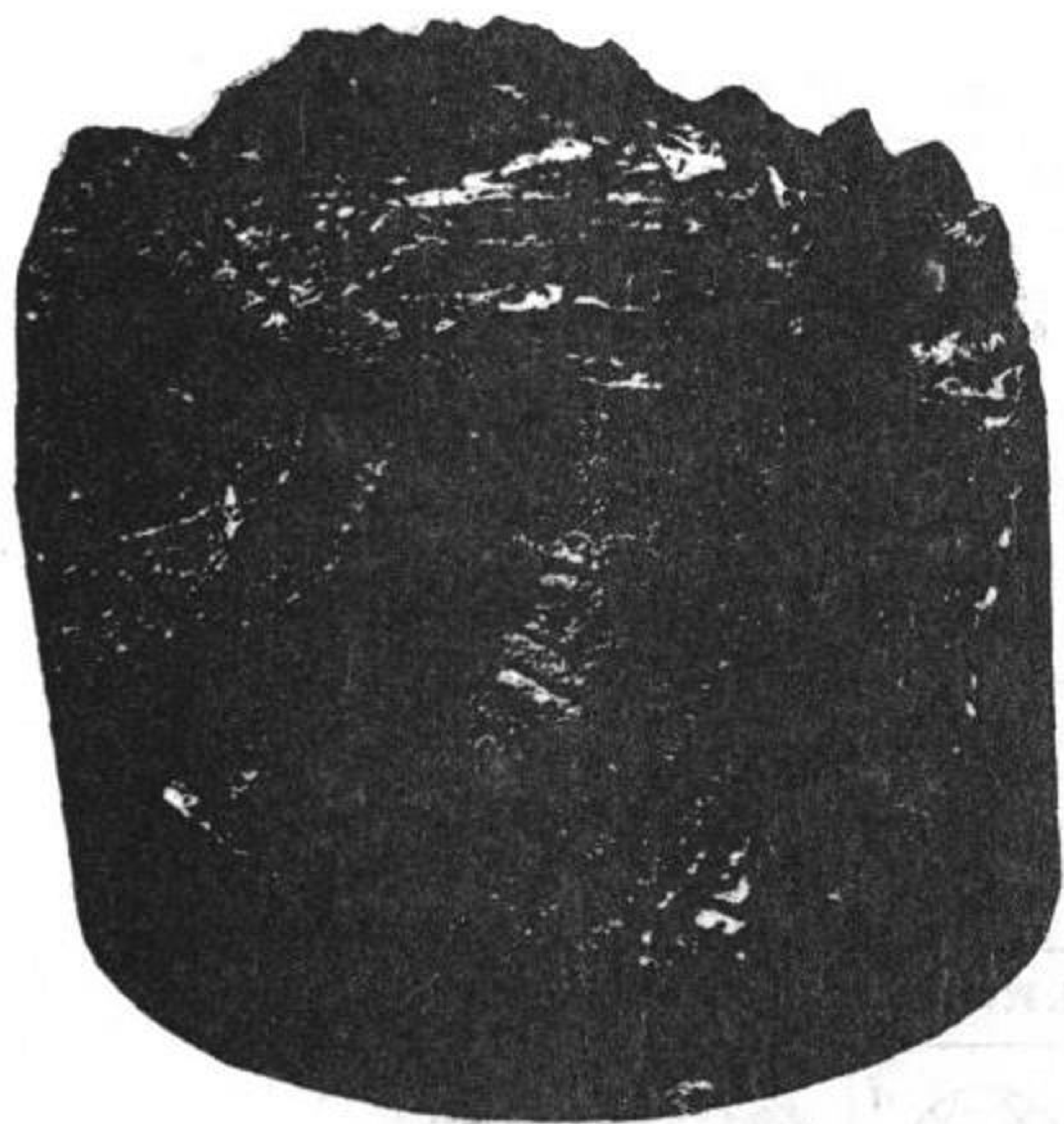


图 3.1.6-18　驱动轴反复扭转疲劳断口

2.5.3　疲劳断口的定量分析

疲劳断口定量分析的依据为断裂力学，材料断裂判据为裂纹尖端应力场强度因子达到或超过材料的断裂韧性K_{IC}，疲劳裂纹扩展速率da/dN与应力场强度因子幅度ΔK存在的指数关系，可以对断裂的累积循环次数N_C、裂纹扩展速率da/dN，最后断裂载荷大小作出估算。

1)断裂载荷估算

由断裂力学的线弹性条件下的断裂判据：

$$K_I=K_{IC} \tag{3.1.6-2}$$

式中：K_I——裂纹尖端应力场强度因子；

K_{IC}——材料的断裂韧性。

$$K_I=Y\sigma\sqrt{a} \tag{3.1.6-3}$$

式中：σ——名义应力；

Y——裂纹几何形状因子，可查表得；

a——裂纹长度或深度，由测量确定。

断裂时的应力：

$$\sigma_C=K_{IC}/Y\sqrt{a} \tag{3.1.6-4}$$

断裂时的载荷（假设为均匀分布）

$$P=\sigma_C F_e \tag{3.1.6-5}$$

式中：F_C——最后断裂区的面积。

2)裂纹扩展速率估算

由P_{aris}经验公式，裂纹扩展速率：

$$\frac{da}{dN}=C\ (\varDelta K)^{m} \tag{3.1.6-6}$$

式中：C、m——取决于材料的参数，查表得到；

$\varDelta K$——应力场强度因子幅值

$$\varDelta K=K_{max}-K_{min}=Y\sigma_{max}\sqrt{a}-Y\sigma_{min}\sqrt{a}=Y\varDelta\sigma\sqrt{a} \tag{3.1.6-7}$$

其中：σ_{max}——疲劳交变应力的最大应力；

σ_{min}——疲劳交变应力的最小应力

$\varDelta\sigma$——应力幅值

$$\varDelta\sigma=\sigma_{max}-\sigma_{min}=2\sigma_a \tag{3.1.6-8}$$

其中：σ_a——疲劳交变应力半幅值。

将式（3.1.6-8）代入式（3.1.6-7）得：

$$\varDelta K=2Y\sigma_a\sqrt{a} \tag{3.1.6-9}$$

将式：（3.1.6-9）代入式（3.1.6-6）得：

$$\frac{da}{dN}=C\ (2y\sigma_a\sqrt{a})^{m}=C^{m}\cdot(2y)^{m}\cdot\sigma_a^{m}\cdot a^{\frac{m}{2}} \tag{3.1.6-10}$$

由式(3.1.6-10)，对已知材料的疲劳零件断口，根据其裂纹形状和位置可查表得几何因子Y值，根据疲劳载荷谱可求得应力半幅σ_a值，则断口上任何深度a时的裂纹扩展速率可估算

得到。

式（3.1.6-10）说明裂纹扩展速率为疲劳载荷和裂纹长度的指数函数，当载荷一定时，裂纹扩展速率随裂纹长度增加而加大

例如：一疲劳断口的最后断裂区和裂纹扩展区交界上测得裂纹长为a_c；疲劳裂纹扩展是在应力幅不变条件下进行。现在估算两根贝纹线之间裂纹的扩展速率。

设载荷谱为对称循环：

$\sigma_{max}=-\sigma_{min}$

$\Delta\sigma=\sigma_{max}-\sigma_{min}=2\sigma_{max}$

$\Delta\sigma=2\sigma_a$

$\sigma_a=\sigma_{max}$

由式（3.1.6-4）最后断裂时的应力σ_c为：

$\sigma_c=\sigma_{max}=K_{IC}/y\sqrt{a_c}$

即　$\sigma_a=K_{IC}/y\sqrt{a_c}$

设分别由断口上测得两根贝纹线对应的裂纹尺寸为a_{N1}和a_{N2}，由式(3.1.6-10)估算得裂纹扩展速率分别为：

$$\frac{d_{aN1}}{d_{N1}}=Cy^m\ (2\sigma_{max})\ ^m a_{N1}^{\frac{m}{2}}=C2^m K_{1c}{}^m a_c^{\frac{-m}{2}} a_{N1}^{\frac{m}{2}}$$

$$\frac{d_{aN2}}{d_{N2}}=cy^m\ (2\sigma_{max})\ ^m a_{N2}^{\frac{m}{2}}=c\cdot 2^m\cdot K_{IC}{}^m\cdot a_c^{\frac{-m}{2}} a_{N2}^{\frac{m}{2}}$$

两贝纹线之间算术平均扩展速率：

$$\frac{d_a}{d_N}=\ (2K_{IC})\ ^m a_c^{\frac{-m}{2}}\cdot C\ (a_{N2}^{\frac{m}{2}}-a_{N1}^{\frac{m}{2}})$$

3)剩余疲劳寿命估算

由式（3.1.6-6）得

$$d_N=\frac{d_a}{c\ (\Delta K)\ ^m}$$

求积

$$\int_o^N dN=\int_{a_o}^{a_c}\frac{d_a}{c\ (\Delta K)\ ^m} \tag{3.1.6-11}$$

式中：a_c——前后断裂时的裂纹长度；

a_o——现存的裂纹长度。

将式（9.1.6-7）代入

$$\int_o^N dN=\int_{a_o}^{a_c}\frac{da}{c\ (y\Delta\sigma\sqrt{a})^m}$$

$$N=\frac{1}{(1-\frac{m}{2})c\cdot y^m\cdot\Delta\sigma^m}\left[a_c^{(1-\frac{m}{2})}-a_o^{(1-\frac{m}{2})}\right] \tag{3.1.6-12}$$

3　金属断口的微观分析

通常所谓微观分析是指用高倍光学显微镜和电子显微镜的分析，分析尺度为微米级。微观分析以形貌为主，辅以组织结构和微区的化学成分分析。

尽管宏观断口形式繁多，但断口的微观形貌最基本的为韧窝型，解理型和沿晶型三种。

3.1 韧窝型微观断口分析

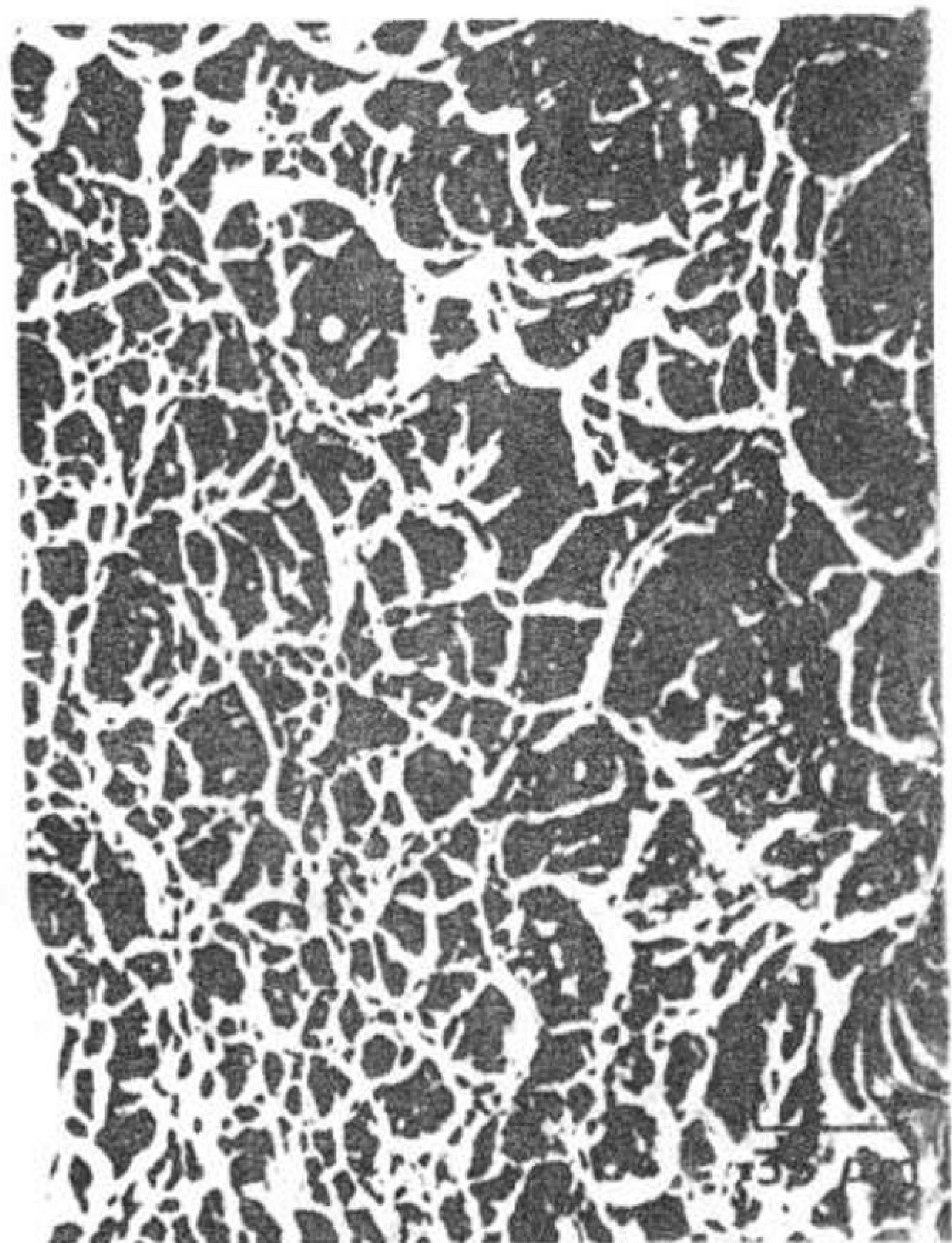


图 3.1.6-19 等轴韧窝花样扫描电镜照片

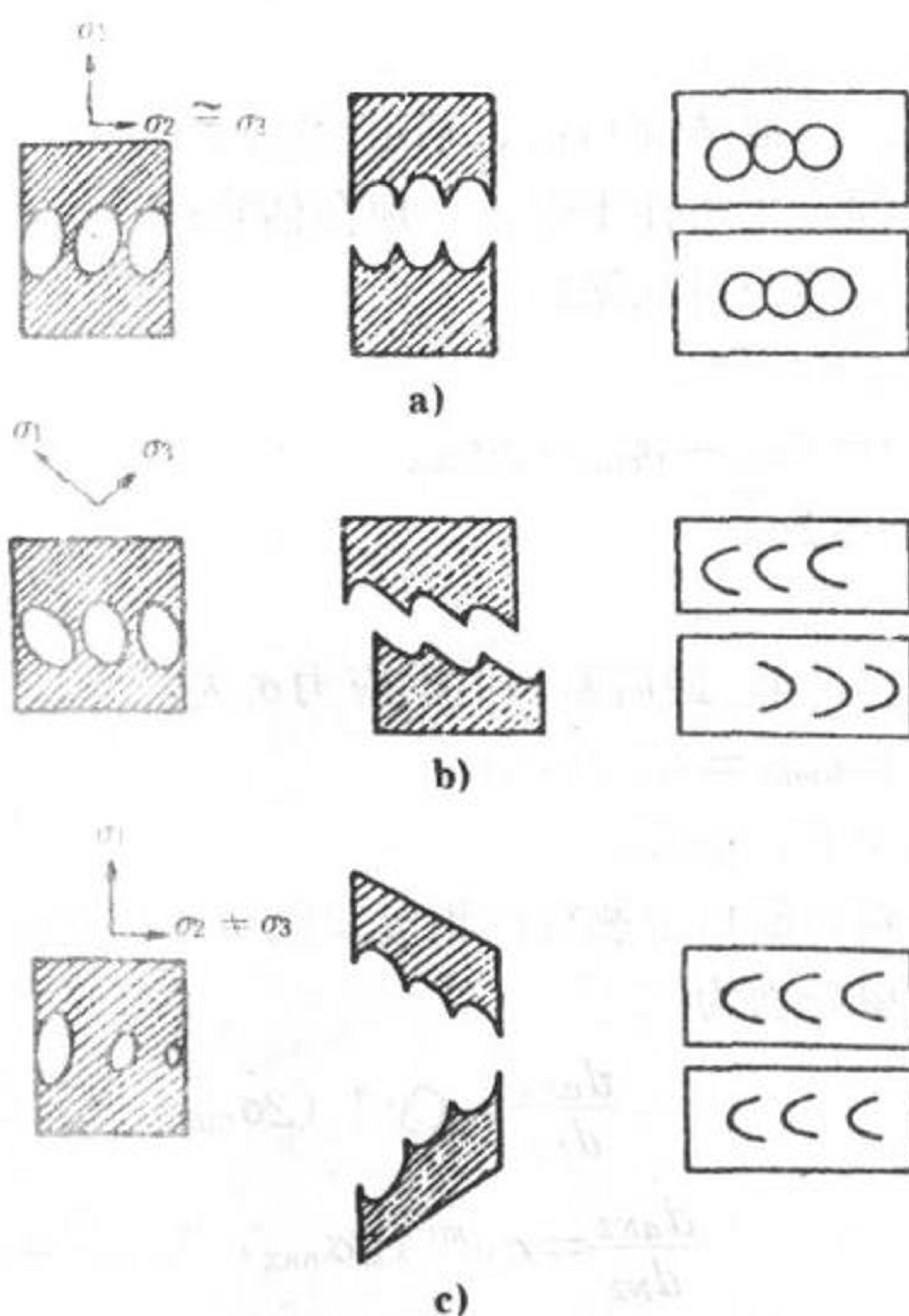


图 3.1.6-20 三种应力状态下微孔形成和形状

a) 正应力；b) 剪切应力；c) 撕裂应力镜照片

1)韧窝微观特征

图 3.1.6-19 为低碳钢拉伸断口中纤维区的微观形貌。扫描电镜下观察到断面微区表面由圆形微坑组成，每个微坑中都有一颗杂质或第二相粒子，微坑的大小不同，都与坑中的杂质或第二相粒子大小相对应。

金属在外加载荷作用下，在微区范围内产生塑性变形，首先使杂质或第二相和基体金属分离，并随变形进行而增大成微孔，微孔之间的基体金属产生塑性拉伸，于是使微孔继续增大，最后在切应力作用下，微孔之间的基体金属断，这样，断面上留下微孔的一半，呈圆形的凹坑，即韧窝花样。

2)不同应力状态下的韧窝形状

韧窝形状随应力状态不同分等轴形和抛物线形。在正应力作用下形成的韧窝为等轴形，如图 3.1.6-20 a) 所示。在剪切应力作用下形成的韧窝为抛物线形，但在断口的相对断面上抛线方向相反，如图 3.1.6-20 b) 所示。在撕裂应力作用下形成的韧窝也是抛物线形，可是在断口的相对断面上抛物线方向相同，如图 3.1.6-20 c) 所示。图 3.1.6-21 为抛物线形状韧窝花样的扫描电镜照片。

因此，根据韧窝的形状可以大致识别断裂的受载方式和应力状态。

当断口上韧窝为主要的微观形貌时，一般可以认为断裂属于韧性的，但是不能认为断口上发现韧窝花样就判定为韧性断裂。因为脆性断裂的断口上，局部微区或表层的平面应力状态区可能为韧窝型的形貌，但由于很少，不足以使整个断裂前发生明显的塑性变形。

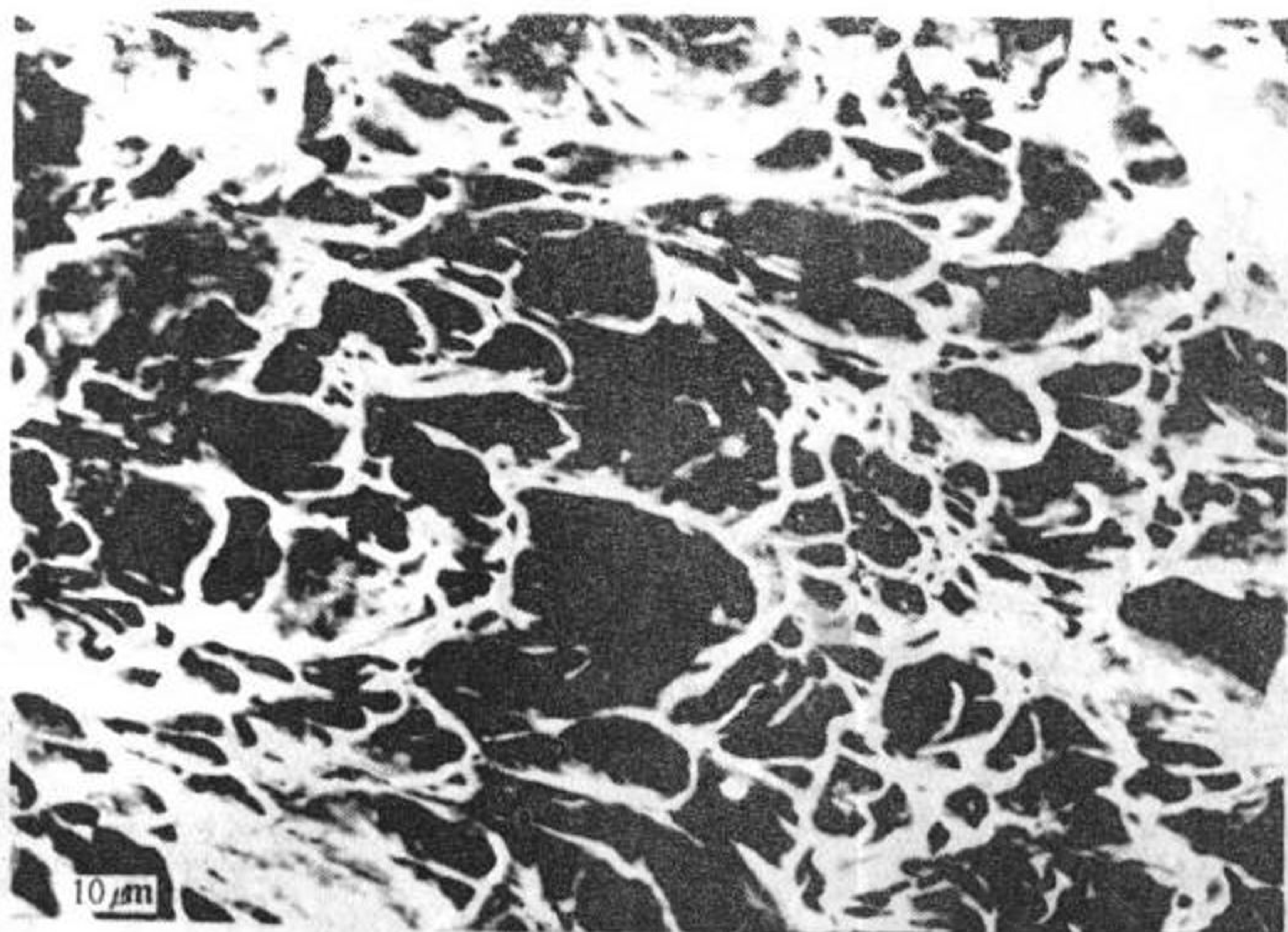


图 3.1.6-21 抛物线状韧窝花样扫描电镜照片

韧窝在晶粒内时属于穿晶断裂，韧窝在晶界上时属于沿晶断裂，如高温蠕变断裂。

3.2 解理型微观断口分析

解理是指金属在正应力作用下，由于金属原子之间的结合键受到破坏而造成沿着一定的严格的结晶学平面（称为解理面）的断裂。

常见金属的解理面见表 3.1.6-13。解理面一般为表面能最小的晶面。解理面本身在电子显微镜下是没有任何几何特征的平面，但在解理型微观断口形貌有三种花样。

表 3.1.6-13 常见金属的解理面

晶系	金属名称	主解理面	次解理面
体心立方	Fe W N_b	{001}	{110}
密排六方	Zn Mg Cd	{0001}	{1124}

1)河流花样

图 3.1.6-22 为河流花样的扫描电镜照片，看到的“河流”是一系列相互平行的解理面扩展时，相互汇合形成的许多台阶所构成，其形成原理如图 3.1.6-23 所示，裂纹是顺着河流方向扩展，而逆水而上可以找到裂纹的发源地。

2)舌状花样

图 3.1.6-24 为舌状花样扫描电镜照片，看到的“舌头”是裂纹沿主解理面 {100} 扩展过程中与形变孪晶相遇，迫使裂纹改变方向，沿着孪晶面 {112} 扩展，于是形成舌状凸台形貌，而与其相对应的断面上为舌状凹坑，如图 3.1.6-25 所示。从舌状花样上也可以分析出裂纹的扩展方向和裂纹源的位置。



图 3.1.6-22　河流花样扫描电镜照片



图 3.1.6-23　河流花样形成示意图

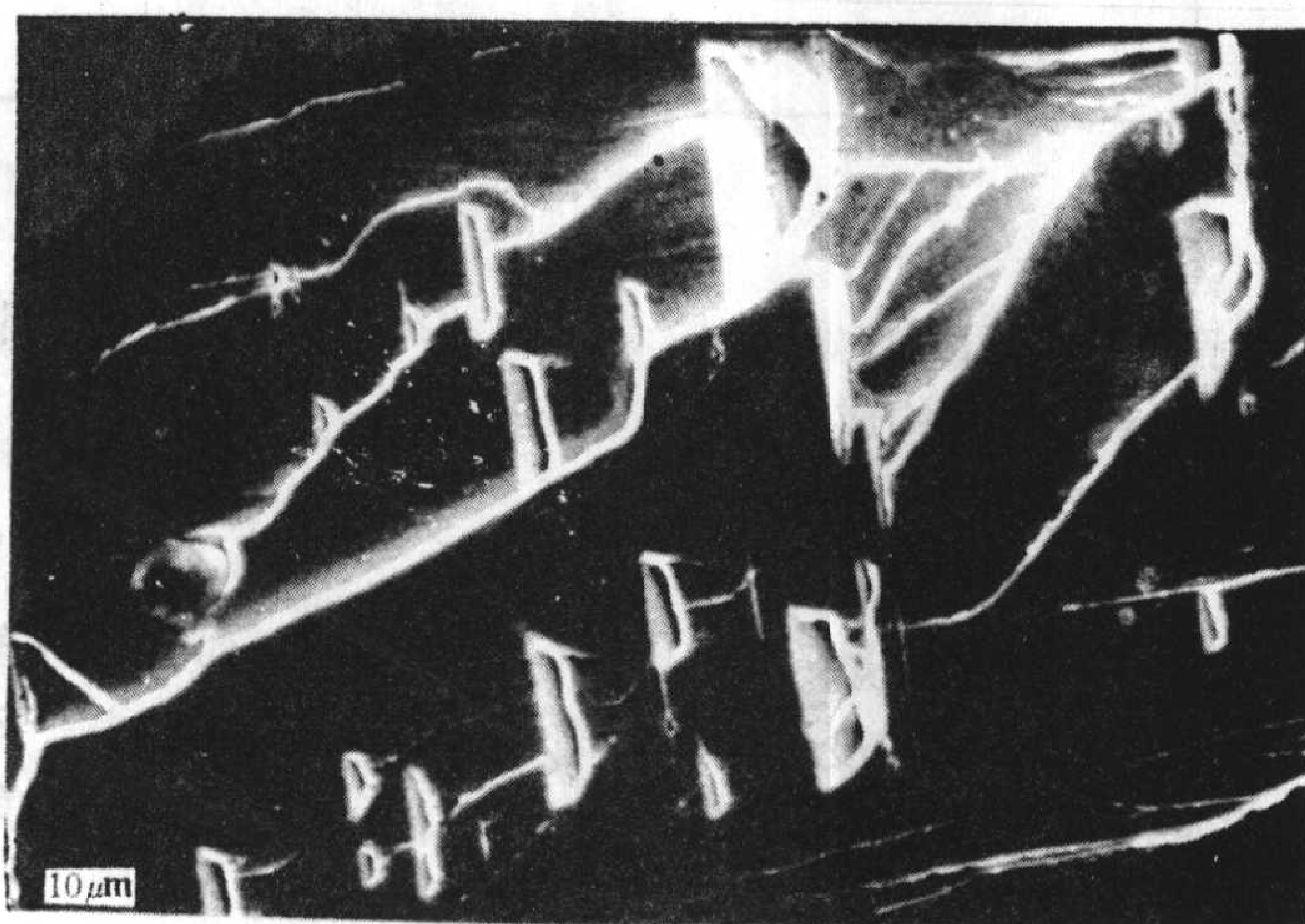
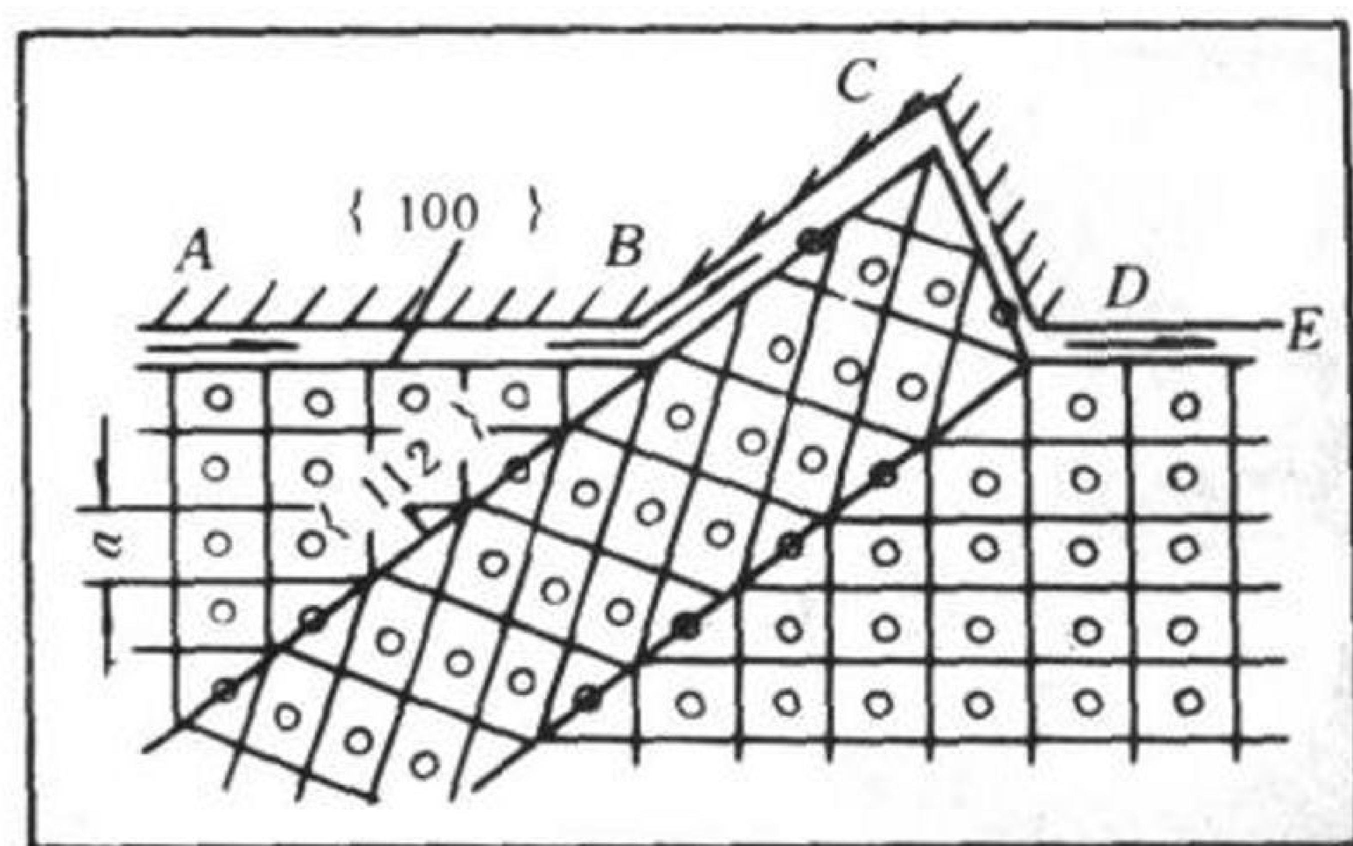


图 3.1.6-24　舌状花样扫描电镜照片

3）鱼骨花样

图 3.1.6-26 为鱼骨花样扫描电镜照片，鱼骨由脊骨和骨刺构成，脊骨为 {100} 面、〈100〉方向上的解理。两侧骨刺分别由{100}面、〈110〉方向上的解理和



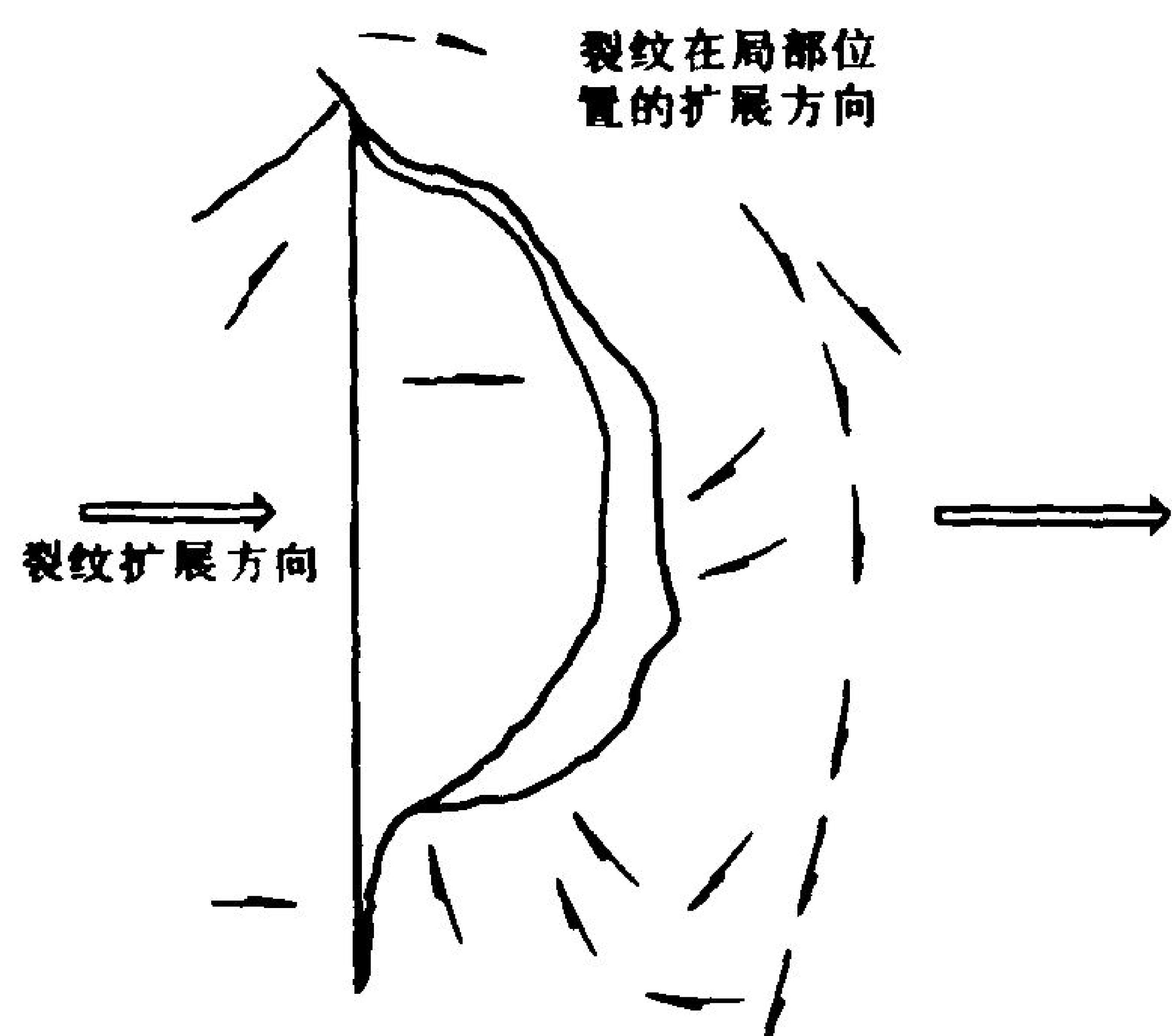


图 3.1.6-25　舌状花样形成示意图

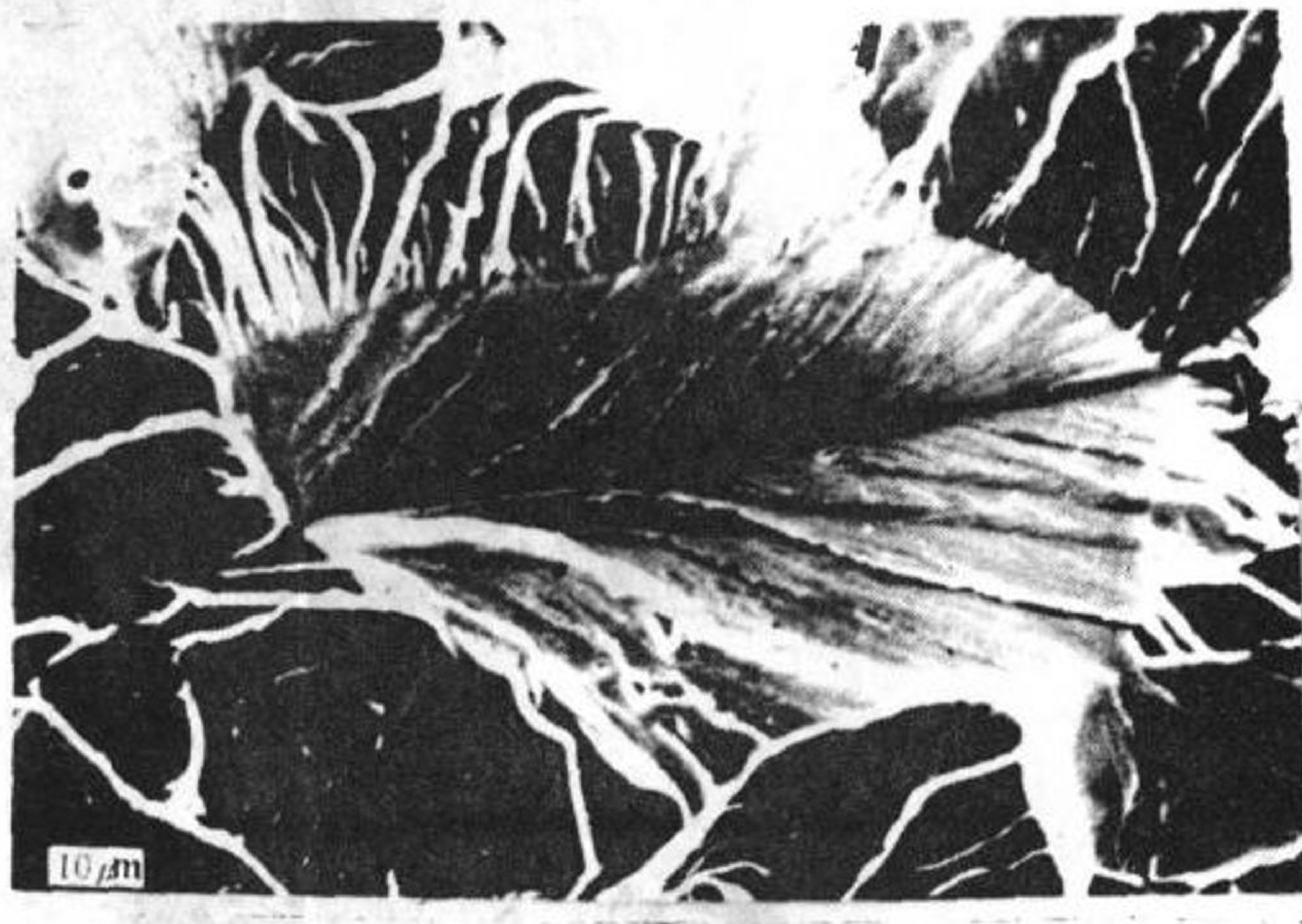


图 3.1.6-26　鱼骨花样扫描电镜照片

{112} 面、〈110〉方向上的解理构成。

解理是属于穿晶断裂。当断口上的微观形貌是以解理为主时，一般可以认为断裂属于脆性断裂，但是不能认为断口上发现解理的各种花样时就判定为脆性断裂，因为韧性断口上的局部微区有可能为解理的花样。

3.3　沿晶型微观断口分析

当裂纹沿着金属晶粒的晶界扩展而导致断裂，其微观断口形貌为沿晶型，通常主要有三种沿晶型花样。

1）冰糖花样

冰糖花样也称岩状花样。图 3.1.6-27 为冰糖花样扫描电镜照片，可见形貌特征为多面体晶体的外形，晶粒界面平滑干净，轮廓清晰。常存在二次裂纹，如图中箭头所指，二次裂纹也是沿晶界展开。

2）沿晶韧窝花样

图 3.1.6-28　为沿晶韧窝花样扫描电镜照片。这种花样多见于高温蠕变断裂的断口上，由于高温蠕变断裂时，首先在变弱的晶界上形成微孔，然后长大合并成空洞，于是裂纹沿晶界扩展，在晶界面上留下许多细小的韧窝。

3）沿晶腐蚀花样

图 3.1.6-29 为沿晶腐蚀花样扫描电镜照片。一般为金属在高温下受到介质的氧化或腐蚀形成的一种微观形貌、晶界界面上被一层氧化物或腐蚀物覆盖着、但晶粒多面体外形仍然明显可见。

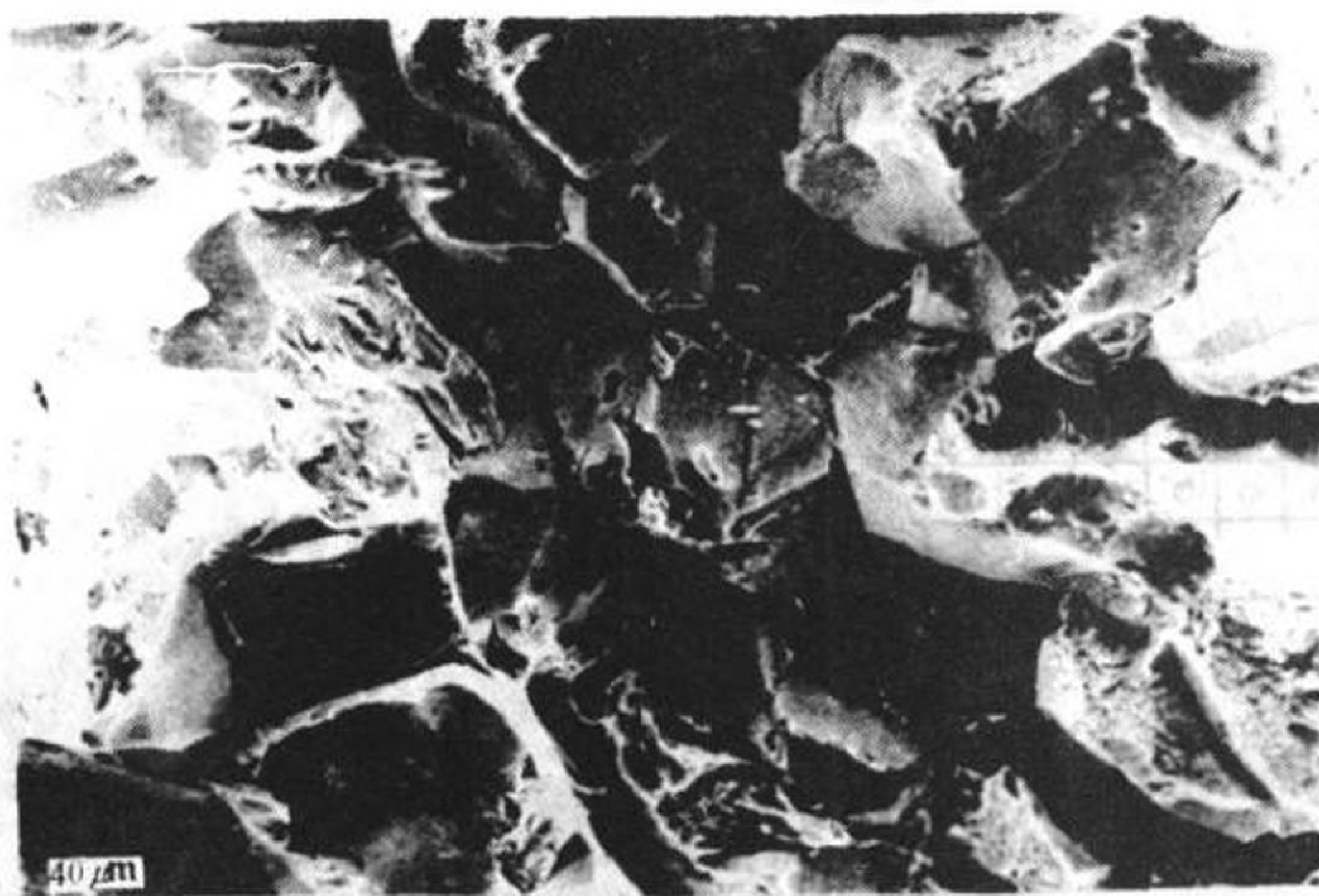


图 3.1.6-27　冰糖花样扫描电镜照片

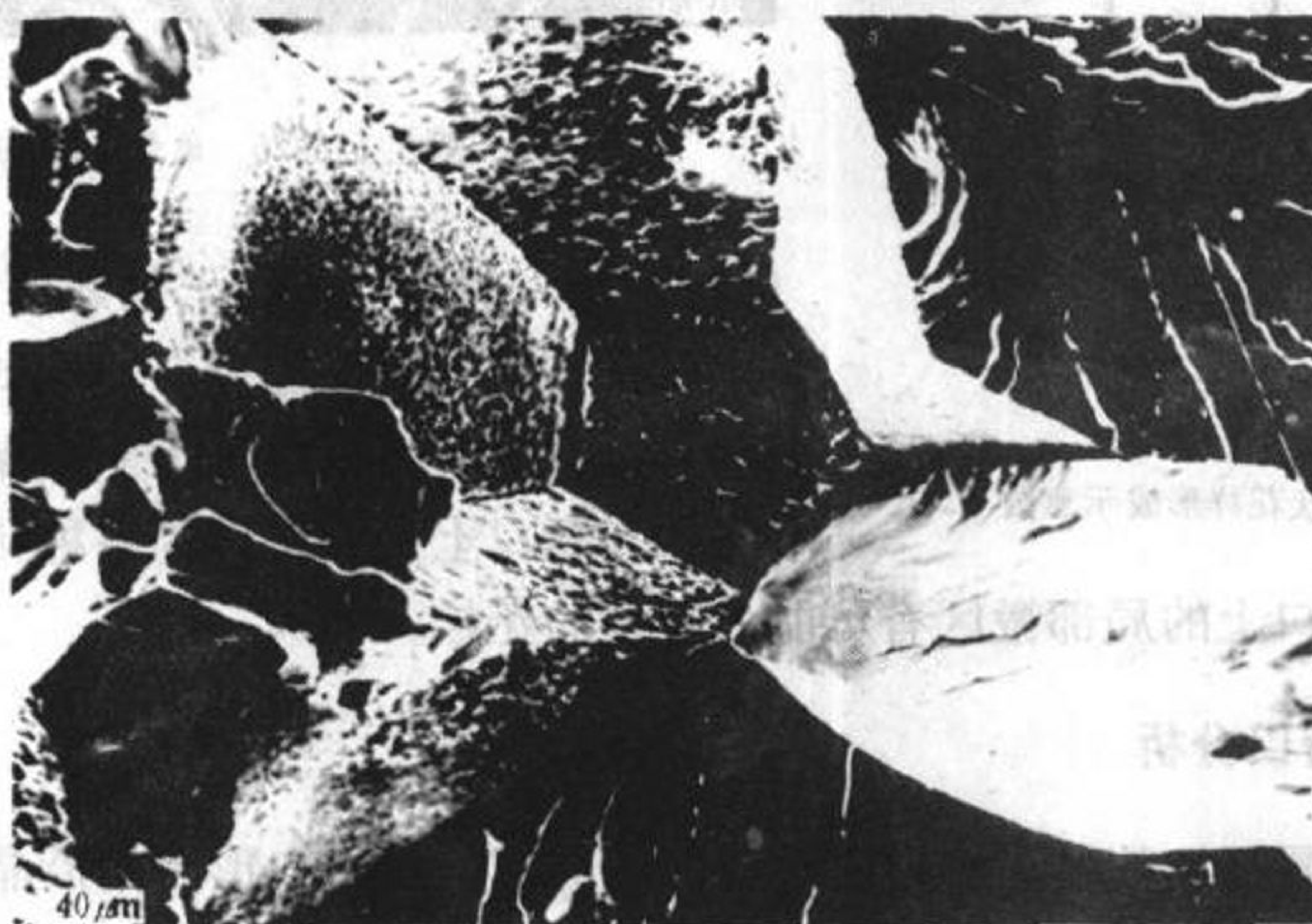


图 3.1.6-28　沿晶韧窝花样扫描电镜照片

当断口上以冰糖花样或沿晶腐蚀花样为主时，可以认为断裂为脆性断裂。但是断口上以沿晶韧窝型为主时，可能为韧性断裂，也可能为脆性断裂，要根据宏观塑性变形大小而定。

3.4　疲劳断口微观分析

疲劳断口微观形貌主要特征为裂纹扩展区的疲劳纹，也称疲劳辉纹，它是由每一个应力循环下疲劳裂纹扩展所留下的痕迹，一般为微米级尺度，在高倍光学显微镜或扫描电镜下可以观察到。

疲劳纹的特征：

金属疲劳断口从宏观上为脆性断口，因为在断裂前金属没有发生明显的塑性变形，但是从微观上，疲劳纹有韧性疲劳纹和脆性疲劳纹两类。钢铁材料的疲劳纹绝大多数为韧性疲劳

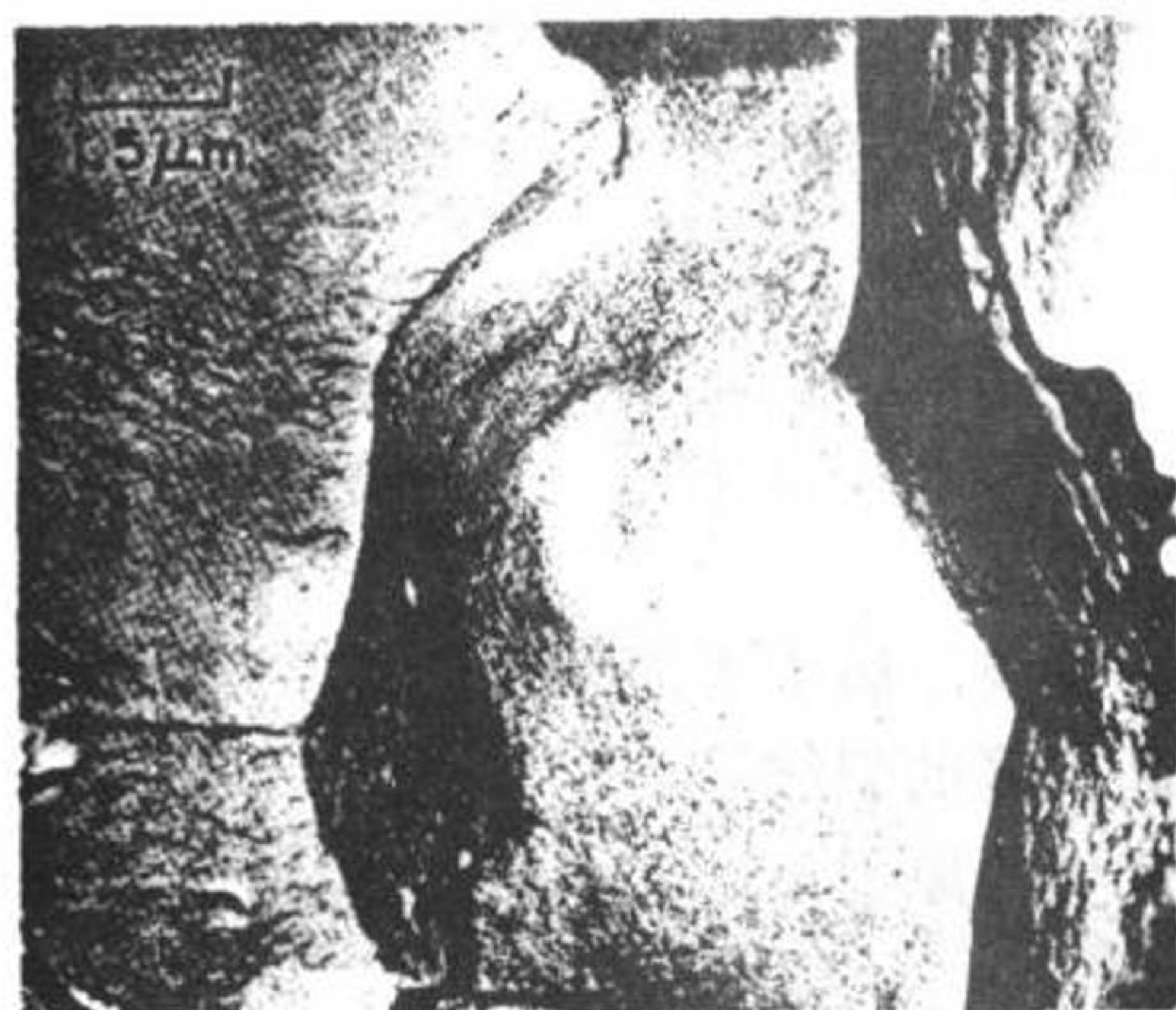


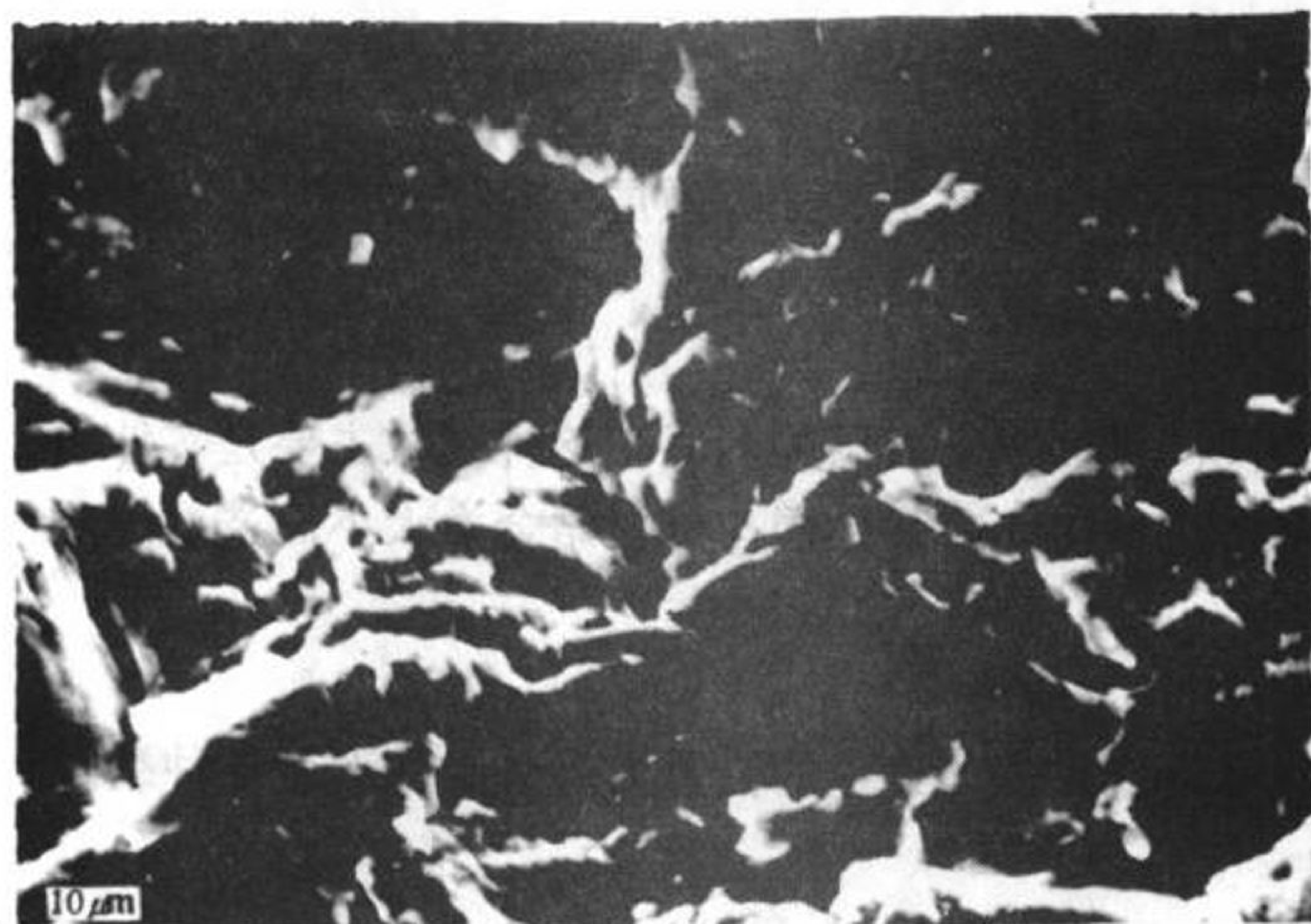
图 3.1.6-29 沿晶腐蚀花样扫描电镜照片

纹，因为在裂纹尖端应力场使金属微区有大量的位错滑移，故微观上存在程度不等的塑性变形。韧性疲劳纹以非晶体学疲劳纹居多，所谓非晶体学疲劳纹的形态与金属的晶体结构、组织无关，因此即使在高倍显微放大下也看不到晶界、显微组织等特征。图 3.1.6-30 为非晶体学韧性疲劳纹扫描电镜照片和特征示意图。

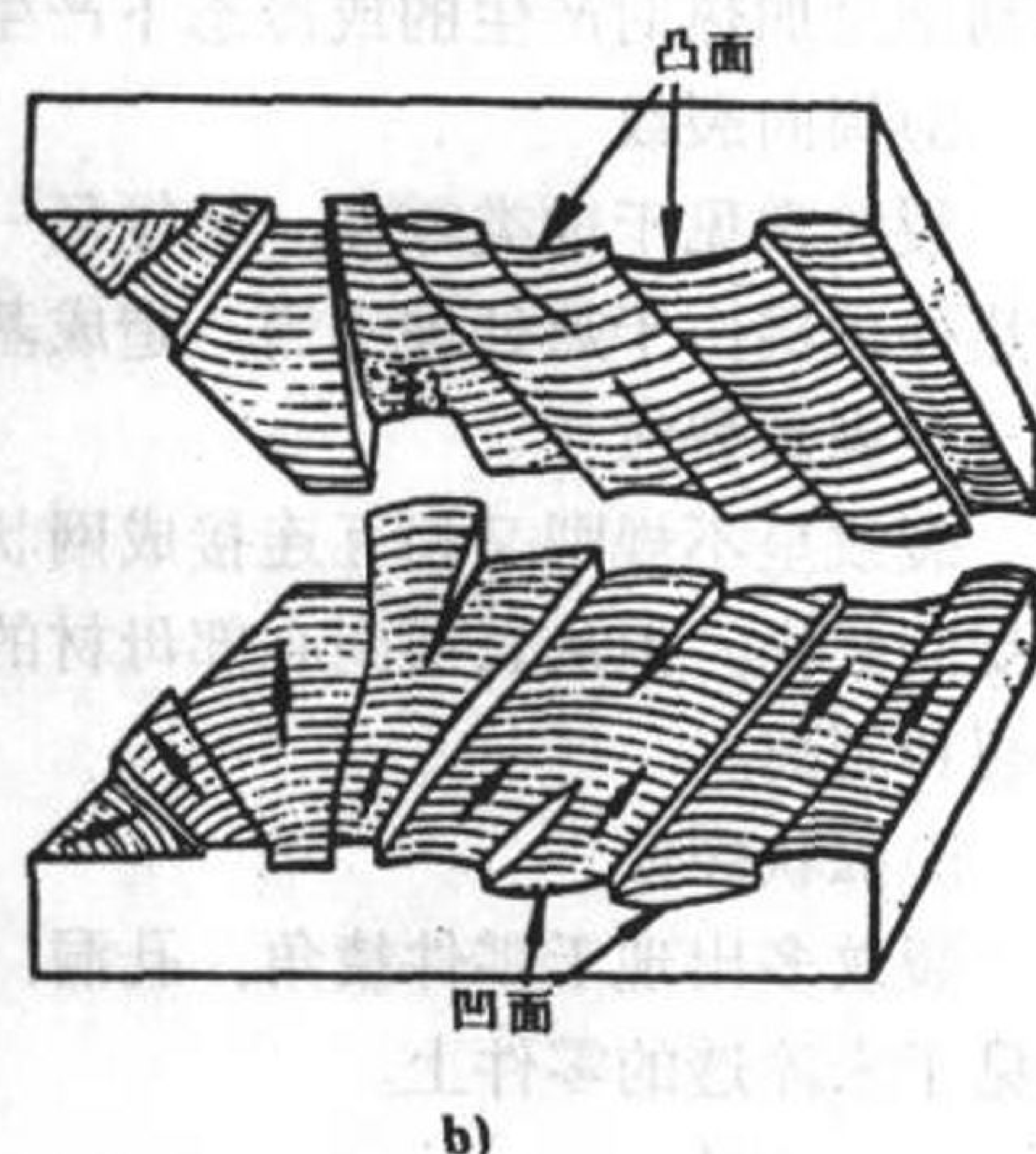
疲劳纹的主要特点如下：

（1）疲劳纹为一系列基本上相互平行的条纹，每一小片上的疲劳纹的垂直方向为裂纹的扩展方向，如图 3.1.6-30 b）中箭头所指。

（2）断口的两面疲劳纹相匹配，疲劳纹的峰和谷的对应关系为峰对峰、谷对谷，而凸出的小片对应的为凹下的。



a）



b）

图 3.1.6-30 非晶体学韧性疲劳纹

a）疲劳纹扫描电镜照片；b）疲劳纹特征

（3）疲劳裂纹扩展面由许多大小不一、方向略有改变、高低不同的小平面组成，在裂纹扩展时，小平面汇合而形成棱边和台阶。

（4）每一条疲劳纹代表一次应力循环，每条疲劳纹表示应力循环下裂纹扩展的前端位置。断口上一定长度内的疲劳纹条数等于裂纹通过所需的循环次数。

（5）严格测量疲劳纹之间间距时，每个间距各不相同，随裂纹扩展有规律地增大，在材料决定之后，疲劳纹间距变化按式（3.1.6-6）。

但不是任何疲劳断口上都存在疲劳纹，通常材料的韧性较好，张开型平面应变状态下，应力幅值较小时，容易发现疲劳纹。结构钢疲劳断口常常很难找到疲劳纹。

4 金属裂纹分析

金属零件或构件常常带有裂纹，这些裂纹可能是制造过程中，如冶炼、铸造、轧制、锻

造、冲压、机械加工、焊接、热处理、装配等工序中产生，也可能在工作过程中产生，有的裂纹成为断裂的裂纹源，会在零件或构件受力工作中失稳扩展或疲劳扩展，最终导致断裂。因此，裂纹存在是有害无利的。

裂纹分析目的在于找出产生裂纹的原因。裂纹分析主要依据裂纹的宏观外形，裂纹走向，裂纹起源位置，裂纹周围和末端情况见表 3.1.6-14。

4.1 裂纹宏观外形分析

1)龟裂或网状裂纹

裂纹外形如龟壳花纹那样呈网状分布。这种裂纹深度浅，属于表面裂纹，常常是由于金属表面的晶粒界面结合力受到弱化或脆化而引起的沿晶扩展的裂纹

产生龟裂的具体原因多数为制造工艺中的问题，产生的原因不同，它的形状特征等也不同。

2)直线状裂纹

裂纹较长，又较直，可能沿零件的长度方向，也可能沿零件横向延伸。这种裂纹常常起源于发纹或非金属夹杂物，并且常和加热冷却制度有关，经常根据裂纹两侧的显微组织特征来判别是加热时产生的或冷态下产生的。

3)周向裂纹

裂纹常见于轴类零件，绕轴径一周。这种裂纹往往是表面淬硬层，渗碳层或其他表面化学热处理层由于热处理不当，造成基体与表层之间的拉应力过大。

4)剥离裂纹

裂纹呈不规则又相互连接成网状，较浅，可以发现表层的剥落。这种裂纹主要是零件表层受到强化，但从表层到心部母材的硬度变化太陡，或强化层与母材结合力太小而造成浅层开裂和剥离。

5)弧状裂纹

裂纹多出现于零件棱角、孔洞、台阶等易造成应力集中的位置上，呈半弧形。这种裂纹多见于未淬透的零件上。

4.2 裂纹起源位置分析

裂纹起源位置取决于应力集中程度大小和材料强度高低两个综合因素，应力集中大并且材料强度又受到削弱的区域常常为裂纹起源位置。

1)材质原因引起的裂纹

金属表面缺陷，如夹渣、斑疤、锻造折迭、氧化、脱碳、过热粗化晶粒、铸造冷隔。金属内部缺陷，如缩孔、气孔、疏松、偏析、夹渣、类杂物和白点等。以上这些缺陷处的材料强度受到削弱、缺陷的尖锐轮廓形成很大的应力集中，因此成为裂纹起源的位置。

2)零件几何形状引起的裂纹

零件由于结构上需要或设计上不合理，使零件有台阶、沟槽、凸台、尖角、盲孔等截面或几何形状突然变化处，在制造过程中或受力工作中，因承载面积徒然变化而在这些位置存在很大应力集中，成为裂纹起源位置。

3)应力分布不均匀条件下的裂纹

零件受到弯曲、扭转、冲击等作用时，零件承载面上应力分布很不均匀，裂纹一般起源

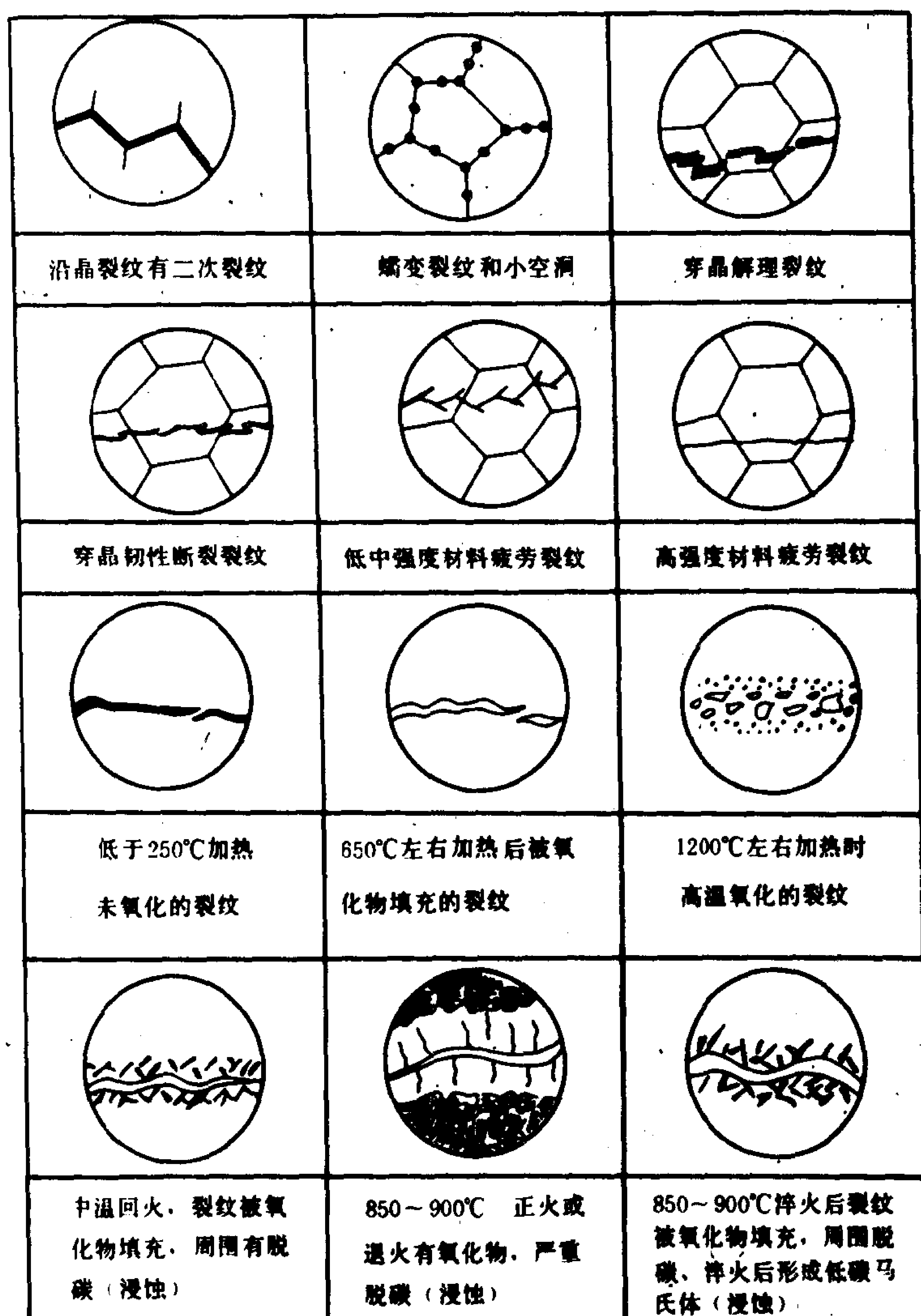


图 3.1.6-31 金属裂纹形态示意图

于正应力最大或正应变最大的位置。

如果由于铸造、锻造、焊接、冲压、车削同时，零件内存在第一类或第二类残余应力时，裂纹一般起源于最大残余拉应力处。

4.3 裂纹走向分析

裂纹宏观上走向遵循应力原则和强度原则

1)应力原则

脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂时，裂纹走向一般与最大正应力方向垂直。处于平面应力状态或纯剪切载荷下的断裂，其裂纹走向也可以平行最大剪切应力。

2)强度原则

裂纹总是选择扩展阻力最小路线。因此裂纹常常经过材料的薄弱环节或缺陷，由于这些区域的强度被削弱。强度原则使裂纹在小范围内拆向而曲折地延伸。

4.4 裂纹周围及末端情况分析

裂纹周围用肉眼或放大镜，显微镜观察时，可发现由于形成裂纹的原因不同，使裂纹两侧的组织形态也不同，如晶粒变粗、晶界氧化，周围脱碳，周围被腐蚀以及有各种填充物等。形成裂纹的原因不同，裂纹末端形状也会不同，或尖细、或粗钝、或圆秃等。

在显微镜下，可以观察到裂纹扩展的微观路径，为穿晶或沿晶的。沿晶裂纹有晶界腐蚀裂纹、氢脆裂纹、回火脆性裂纹、磨削裂纹、焊接裂纹、热疲劳裂纹、过烧锻造裂纹、铸造热裂纹、蠕变裂纹、热脆裂纹。

穿晶裂纹有疲劳裂纹、解理裂纹、淬火裂纹、焊接冷裂纹，其他韧性断裂裂纹。穿晶裂纹在遇到晶界、亚晶界、硬质点或其它组织性能不均匀区时，往往会改变方向。

显微镜下的裂纹形态特征见图 3.1.6-31。表 3.1.6-14 为金属裂纹形成原因及其外形、起源、走向、周围情况、末端情况等特征。

表 3.1.6-14　**常见金属裂纹的名称、形成原因及其特征**

裂纹名称		裂纹形成原因	裂纹的特征						备注
大类	小类		宏观外形	起源位置	走向	周围情况	末端情况	其它特征	
铸造裂纹	铸造热裂纹	铸造热裂纹是在高温下（约 215～1450℃）形成的。它的形成原因有：金属冷凝时，在形成热裂的温度范围内收缩率过大；铸件在砂型中收缩受阻；铸件设计不合理，厚薄相差悬殊，冷却严重不均匀；铸件金属中有害杂质较多，在金属凝固后，有害杂质聚集于晶界，降低了金属的强度和塑性，金属铸件表面与涂料相互作用等。	有时呈网状或半网状（龟裂）。	铸件的最后凝固区；应力集中处	沿晶界扩展	有严重的氧化脱碳，有时还有严重的偏析、疏松、杂质和孔洞等。	圆秃		
	铸造冷裂纹	铸造冷裂纹是较低温度下产生的，它的形成原因主要是由于热应力和组织应力造成的。		应力集中区	穿晶扩展	基本上没有氧化、脱碳、裂纹两侧的组织与基体金属相差不大。			

续上表

裂纹名称		裂纹形成原因	裂纹的特征						备注
大类	小类		宏观外形	起源位置	走向	周围情况	末端情况	其它特征	
锻造裂纹	折迭	前一道锻、轧所产生的突出尖角或"耳子",在后一道锻、轧时被压入金属坯内而形成。	轧制件上呈纵向单条分布，锻体上分布。无一定规律，裂纹与表面呈一锐角夹角。			有氧化夹杂并有严重脱碳情况。	粗钝		
	过热、过烧、锻造裂纹	因轧、锻前加热温度过高。	呈龟裂状或呈鱼鳞状。	锻件表面或在变形最大区	沿晶界扩展	有严重的氧化、脱碳			基体组织还有过热、过烧的其他特征。
	铜脆	钢的含铜量较高；或在锻造加热时，毛坯表面渗入金属铜。	呈龟裂状或呈鱼鳞状	在锻件表面或在渗铜处	沿晶界扩展	有铜相			
	热脆	钢的含硫量过高，锻造加热时在晶界处FeS熔化，的锻造时沿晶界开裂			沿晶界扩展			晶界有硫化物夹杂相	钢的硫化级别较高
	加热不足锻造裂纹	轧、锻前加热保温时间不够，心部尚未热透。	一般呈放射状	锻件心部	一般为穿晶扩展	有氧化、脱碳现象。			
	终锻温度过低锻裂	终锻温度过低，材料塑性下降；或因锻造温度在$Ar_3 \sim Ar_1$之间时，铁素体开始晶界析出，进一步锻造时，则沿铁素体开裂。	有时呈扇形	应力集中处或在晶界铁素体处	锻造温度过低时，裂纹穿晶扩展；在$Ar_2 \sim Ar_1$之间锻裂时，裂纹沿晶界上的铁素体扩展。	略有氧化、脱碳现象。			
	皮下气泡引起的锻裂	皮下气泡未除尽	与表面垂直	次表面皮下气泡处		有时有氧化的情况			
	锻、轧半成品中的发纹	有发纹的钢材，进一步进行锻造轧制。	沿纵向直线状	发纹所在位置	沿轧制方向（纵向）分布		圆秃		在纵向断口上还可能有发纹的其他特征

续上表

裂纹名称		裂纹形成原因	裂纹的特征						备注
大类	小类		宏观外形	起源位置	走向	周围情况	末端情况	其它特征	
焊接裂纹	焊接热裂纹	在1100~1300℃之间，因热应力作用产生，形成热裂纹的可能性与基体金属、焊条金属的成分有很大关系，一般地说，合金钢或含碳量较高、强度较大的钢，发生热裂的可能性较大。	有时呈蟹脚状一网状，有时呈曲线状。	一般在焊缝区内起源	沿晶界扩展	有氧化、脱碳、有时还有焊料。			
	焊接冷裂纹	在100~300℃之间，因热应力和组织应力的共同作用而产生。有人认为焊接冷裂纹是由于100~300℃温度范围内氢气析出及聚集作用的缘故。		应力集中处或组织过渡区内（在热影响区内）	一般具有穿晶断裂的特征	很少氧化脱碳			
	磨削裂纹	由于磨削加热引起的组织应力和热应力、以及在磨削过程中进一步的组织转变(如残余奥氏体的转变)和应力的再分配等原因。	龟裂或呈辐射状，或呈有规则的排列。	在金属的磨削表面层内	沿晶界分布	有时有微弱的氧化	呈喇叭形		磨削表面有时有氧化色彩
淬火回火裂纹	淬火龟裂	表面脱碳的高碳钢零件，在淬火时，因表面层金属的比容比中心小，在拉应力作用下产生龟裂。	龟裂	脱碳表面	沿晶界分布	一般没有或很少氧化	尖细	裂纹一般只限在表面脱碳层内	
	淬火直线裂纹	细长零件，且心部完全淬透的情况下，由于组织应力和热应力的共同作用而产生纵向直线裂纹	纵向直线	有时在应力集中处，有时在夹杂处起源	穿晶分布	一般没有或很少氧化	尖细		
	过热或过烧引起的淬火裂纹	淬火加热温度过高，产生了过热和过烧，削弱了晶界，在淬火时，在组织应力和热应力的作用下而开裂。		应力集中处	一般沿晶分布	一般没有或很少氧化	尖细		
	其他淬火裂纹	凹槽、缺口处因冷却速度较小；零件过大、或钢的淬透性太小，产生中心未淬透区。由于种种原因引起的淬火软点附近的组织过渡区，上述区域在拉应力的作用下而开裂。	一般呈弧形裂纹	凹槽、凹角、缺口等应力集中处，或组织过渡区。	一般为穿晶开裂	一般没有或很少氧化	尖细		一般在组织过渡区

续上表

裂纹名称		裂纹形成原因	裂纹的特征						备注
大类	小类		宏观外形	起源位置	走向	周围情况	末端情况	其它特征	
淬火、回火裂纹	回火脆性裂纹	具有回火脆性的钢，在回火脆性温度范围内回火时，冷却速度太小，或零件太大等原因引起回火脆性，在随后的校直或使用过程中而开裂。		一般在应力集中处	一般沿晶开裂				
在使用过程中产生的裂纹	应力腐蚀裂纹	在腐蚀介质和张应力的共同作用下产生的	有时呈网状	与腐蚀介质接触的表面上（受力状态一定要有张应力的成分）	沿晶扩展	有时有腐蚀产物			金属的电阻增加，有时甚至失去金属的声音
	氢脆裂纹	金属中含有的氢或在电镀过程中渗入金属的氢在某处聚集，造成很大的内应力最后导致开裂			沿晶分布	比较干净			
	疲劳裂纹	在交变载荷作用下产生		符合强度原则和应力原则	穿晶分布	有时有金属的磨屑	尖细		
	蠕变裂纹	金属在高温工作时		应力集中处	沿晶分布	有严重的氧化			
	韧性撕裂	所受载荷超过金属的强度极限而开裂	当受力以张应力为主时，开裂方向与张应力成45°，当受力以剪应力为主时，开裂方向与剪应力平行。	一般在应力集中处	穿晶分布				

5　零件失效分析的一般程序

5.1　失效分析的目的和意义

1)失效分析的目的

准确地找出失效原因，提出防止失效的对策和措施，为改进设计、选择材料或设计新材料，为制定正确的制造工艺，为改善使用和维护规程提供科学依据。

2)失效分析的意义

（1）通过失效分析找到失效原因，提出对策，从而避免再犯。

（2）判断设计是否正确，为改进设计原则和依据提供更合适的设计参数。

（3）判断材料的组织、性能是否符合要求，为正确选材或新设计材料提供依据。

（4）暴露制造工艺中的问题，为提高工艺质量、改善工艺制度以及研究新工艺提供资料。

（5）判断是否使用或维护不正确，为改进和制订使用规程、维修守则及延长使用寿命的方法提供依据。

（6）发现正在使用中零件的缺陷或裂纹，为其改善方案和估算剩余寿命提供依据和参数。

5.2 断裂失效分析基本程序

轮机零件失效以表面损伤和断裂失效最为常见。断裂失效虽然所占比例不大，但它可能会导致许多零件，或一个组合件，甚至整台机器损坏，更严重时会引起海损事故。通过失效分析，寻找引起破坏的原因，必须按一定的科学程序进行，否则会使分析工作杂乱无章，有可能得出错误结论。甚至使有价值的信息遭到人为的破坏或丧失，不仅使分析失败，还无法再重新分析。一般分析程序见图 3.1.6-32。

总的分析内容要视具体失效事件而定，但以下主要内容必须有：

1）现场调查，找到首先破坏件

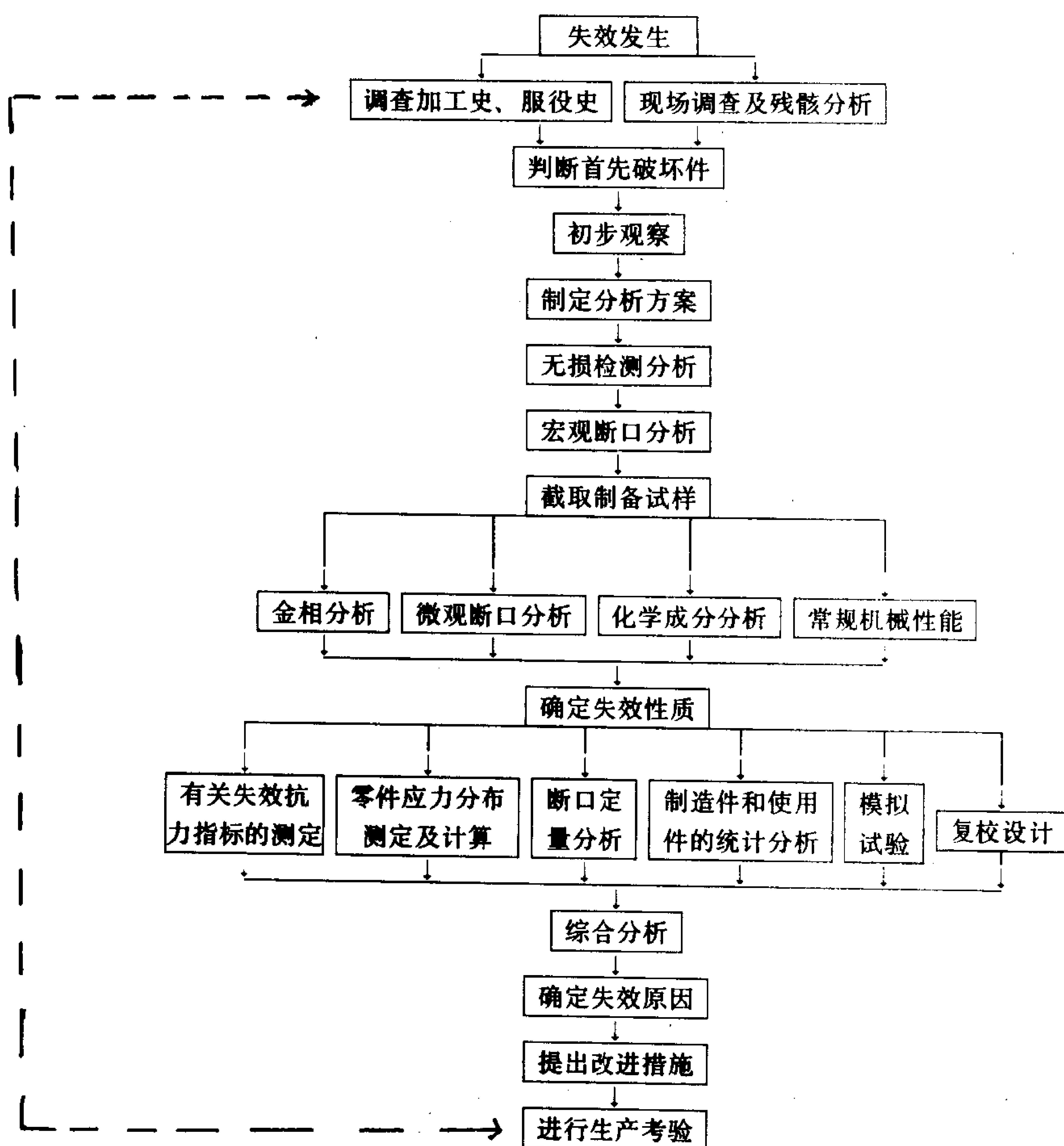


图 3.1.6-32 断裂失效分析一般程序

主要了解破坏的现场，破坏件在机器中的位置，与周围零件的关系，在机器中的功能。如果破坏前有运行记录或现场使用人员，也要尽可能地了解破坏件工作中的各种情况。有的破坏形成许多残骸，必须一个不漏地找到，并记录散落的位置分布，并尽可能地把残骸拼凑起来，根据裂纹走向，找到首先破坏件。

2)制订分析方案和步骤

分析方案包括分析内容、分析方法，所需采用的仪器装置。其中实验室分析常常是寻找断裂原因主要一步，但对于难于搬运的破坏件，则必须取样，取得的样品要具有足够的代表性。

由于首先破坏件是唯一的，裂纹源也是集中在一个很小的区域内，因此必须保护，以免在分析中造成人为的破坏损伤，更不能在整个分析完成前毁坏。为此分析的顺序应该是先宏观分析后微观分析；先整体分析后局部分析；先无损检测后作破坏性分析；先光学显微分析后电子显微分析；先扫描电镜分析后透射电镜分析。并尽可能做到不分割失效件，不消毁断口的形貌特征和其它信息。

3)综合分析作出结论

失效分析的结论是通过系列中的各种试验后得到。但是，在制订分析方案时，根据现场调查和初步观察分析，已有初步的判断，由于判断错误的可能性存在，只有通过综合各种试验以后才能确定确切的失效原因。

失效原因一般从 6 个方面去分析：（1）设计上的原因；（2）选材和材质的原因；（3）制造工艺和热处理的原因；（4）装配和运输造成的原因；（5）操作使用和维护上原因；（6）环境影响的原因。

拟订分析方案时，不可能把所有的分析手段都应用上去，必然有人为的选择，处理试验数据中也会有客观或主观因素造成差错和失真，还有不可估计的偶然因素造成的分析失败或失误，这些都必须通过综合比较分析，去伪存真才能得出正确结论。

5.3 材质因素造成的失效原因分析

材质因素包括材料失效抗力指标；选材原则和依据；材料成分的合理性；材料化学成份的均匀性；材料组织状态；材料冶金质量；材料的残余应力；材料强化层性能和分布；技术标准的合理性。

1)材料失效抗力指标

零件失效后，根据失效的性质和形式，分析零件所采用的材料应该具有怎样的抗力指标，包括强度指标、塑性指标和韧性指标。分析抗力指标与零件的工作载荷性质（一次静载、冲击载荷、交变载荷等），载荷形式（拉伸、压缩、弯曲、扭转等），工作环境（工作温度、环境介质）是否符合失效抗力指标。

2)选材原则和依据　选择零件的材料，通常主要满足结构强度来确定采用的机械性能指标。然而材料的机械强度是用形状简单，尺寸比较小，加载方式单一的条件下测得。零件的结构强度是指零件承受载荷的能力，由于零件形状复杂，尺寸大小变化，存在大小不等的应力集中，其尺寸一般比试样大，存在缺陷的机率高，加载方式又常常不是单一的而是复合作用，所以零件的结构强度不同于材料的强度。因此在选用材料时可能因选用的材料性能指标不恰当，造成选材的不合理。

例如紧固螺栓的选材，仅仅以材料光滑拉伸强度作为依据，错误地认为螺栓的结构强度

就是材料承受拉伸的抗力，这样就可能只选强度高的材料，显然选材不合理了。因为螺栓失效主要是材料的缺口效应，即缺口造成应力集中程度和对缺口敏感性，或缺口造成的脆化倾向大小，选择材料时不仅要依据材料的强度指标，还要有足够的韧性配合。

3)材料成分合理性

通常选定材料的牌号后，材料的成分和机械性能应该是合理的，但有以下情况时会出现材料成分不合理，并会导致依据化学成分制订的热处理制度不合理，热处理制度不合理又会导致机械性能上的差错。

(1)不同厂家，不同炉号的材料主要化学成分，如含碳量波动过大，使热处理后的性能也大幅度地变化，或淬硬层的厚度、硬度波动过大。

(2)有害杂质元素含量偏高或超过标准，如硫磷含量，造成零件在热加工过程中缺陷，使承载能力下降。

(3)材料成分标准中没有明确规定的微量元素含量过高，如镍、钼、钒、钛、铌、硼等，主要使材料的韧性下降，使零件热处理中产生裂纹等缺陷。

(4)标准本身不合理，成分和性能不合格，生产中发生混料。

4)材料成分的均匀性

材料的化学成分不均匀性是经常存在的，因此使零件的化学成分必然不均匀，如冶炼后浇铸时形成铸锭树枝偏析、方框偏析，并在轧制后保留下来。铸铁件石墨的比重偏析，杂质在最后凝固区的聚集。焊接时母材和焊接材料成分的差异，焊接区心部边缘成分不同。热处理形成的脱碳或增碳以及晶内成分的偏析。以上的宏观上和微观上的化学成分不均匀性导致机械性能不均匀，构成薄弱区。

5)材料的组织状态

许多零件不仅要求一定的强度，还要求具有一定的组织状态，包括晶粒度，相组成和形态，组织的均匀性等。一般认为粗大的晶粒，粗大的马氏体，魏氏组织，大块状残余奥氏体，上贝氏体，网状渗碳体等是不正常组织。因为这些组织造成显微范围内机械性能的严重不均匀性，削弱晶界强度，增加材料脆性，常常成为裂纹的萌生地。

6)材料的冶金质量

材料冶金质量除了通常的化学成分区域性偏析和晶内偏析，晶粒形状大小表层和心部不同，杂质在最后凝固区偏聚以外，非金属夹杂物的含量，大小以及分布情况会关系到零件的失效抗力。因为非金属夹杂物常常是裂纹萌生点，使疲劳裂纹提前形成，降低疲劳极限和寿命。非金属夹杂使金属的断裂韧性下降。

7)残余应力情况

铸造、锻造、热处理、冲压、焊接、机械加工都会使零件产生第一类和第二类残余应力。通常残余拉应力是有害的，它在零件受载荷后与外加应力叠加，相当于使材料的承载能力下降；残余应力可能使应力集中更为严重，成为裂纹萌生位置；残余应力使零件在工作中应力再分配，可能使零件发生永久变形；残余应力使材料的抗腐蚀能力下降，成为应力腐蚀的主要因素之一。

8)材料强化层

材料表面强化是提高零件表面性能的有效工艺，但是一些强化层常存在缺陷，如表层疏松，表层过脆、表面微裂纹，表层和母材结合强度不够，硬度梯度过陡，表层出现残余拉应力，强化层厚度不均匀或过浅等。

不合理的表面强化有可能反而使零件抵抗失效能力下降，例如表面强化后，如果表层残余应力为拉应力状态，尽管硬度提高了，但是疲劳强度，应力腐蚀抗力都明显地下降。

9)技术标准合理性

技术标准对于常用材料一般是合理的，但在选用时可能不合于零件的工作条件。在新材料新工艺中技术标准可能不完善或不合理。

5.4 断口分析步骤

找到破坏零件的残骸后，按图 3.1.6-33 所列步骤进行断口分析，其目的是找到引起断裂失效的原因。断口分析步骤的制订要在确定失效分析程序之后，作为分析程序中的一个环节。

6 材料检验的现代方法

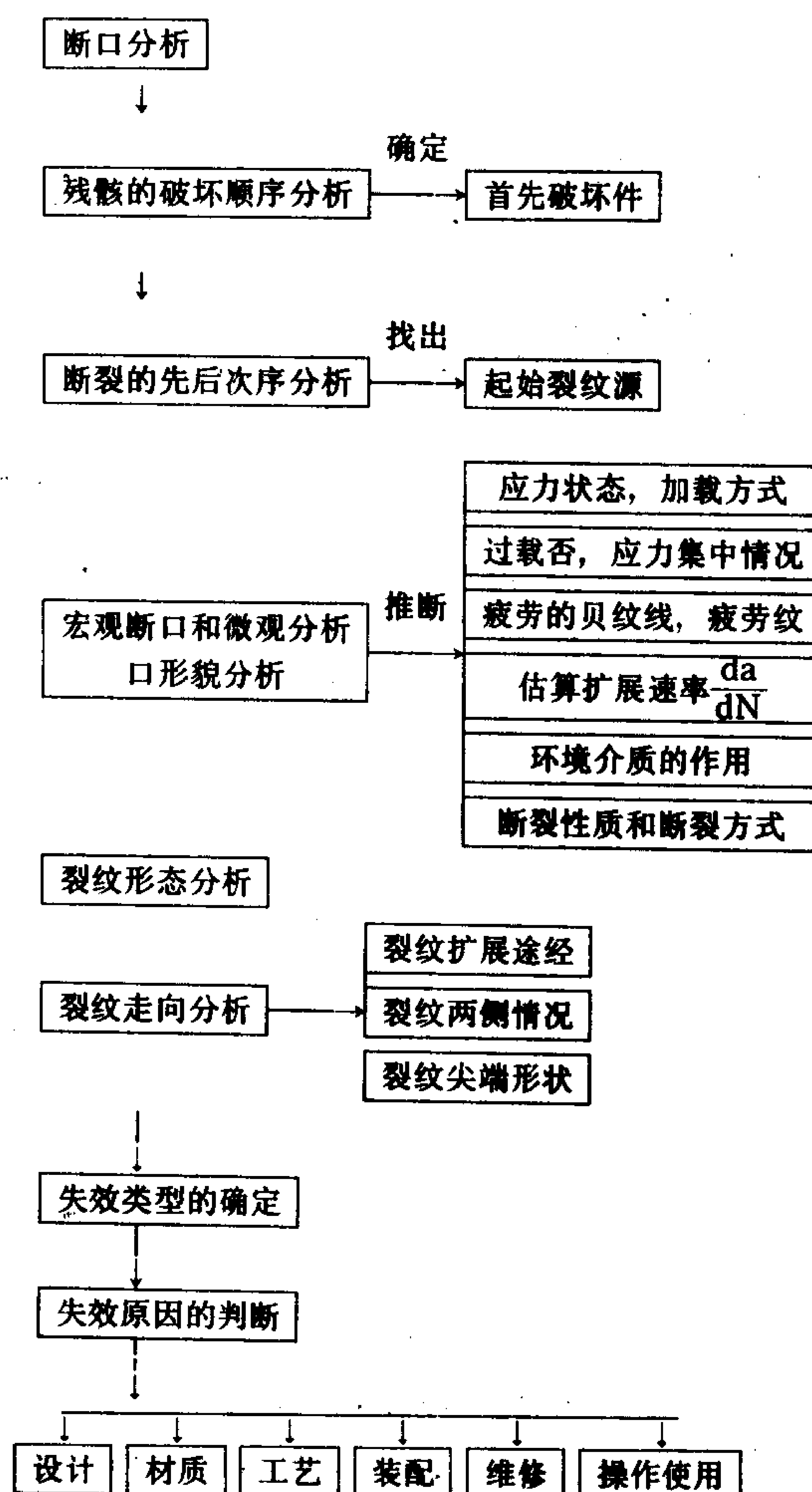


图 3.1.6-33 断口分析步骤

金属材料在生产和加工中不可避免地产生各种缺陷，这些缺陷使零件的失效抗力下降。因此，生产部门和使用部门必须采取各种手段对材料进行检验分析，以保证质量，及时发现缺陷，排除隐患。现代检验方法，主要应用现代物理最新成就，形成一套完整的检验技术，包括光学的、声学的、电磁学的和电子学技术。制成了X射线、γ射线、荧光、超声波等探伤仪器，光学显微分析仪器，X射线应力测定和X射线相结构分析仪器，电子显微分析和微区化

学成分分析仪器。

6.1 无损探伤

零件由于材料内部或表层有宏观尺度的缺陷，如夹渣、夹层、折叠、气孔、缩孔、砂眼、发纹等，形成应力集中部位和裂纹的萌生点。当这些缺陷位于零件工作表面并垂直于主要受力方向，或有较大的夹角时，其危害很大。

无损检验可以保持零件完整无损的条件下检验，现代主要方法有X射线、γ射线、超声波、磁粉、涡流、荧光、声发射和全息摄影等现代探伤技术，可以用来确定缺陷位置、性质，大小和形状。

6.1.1 射线探伤

1)射线探伤原理

当X射线或γ射线照射到有缺陷的工件时由于构成工件材料的原子序数较大，吸收的射线多，使透过去的射线强度就相对较低。而材料中的缺陷内的空气或夹渣等物质的原子序数较材料要小，因此射线通过缺陷时被吸收的少，透射过去的强度较高，于是放在被测工件下面的感光胶片就受到不同强度的感光，如图 3.1.6-34 所示那样，在胶片上对应于缺陷的位置上，记录了感光强度较大而造成黑度较大的投影。

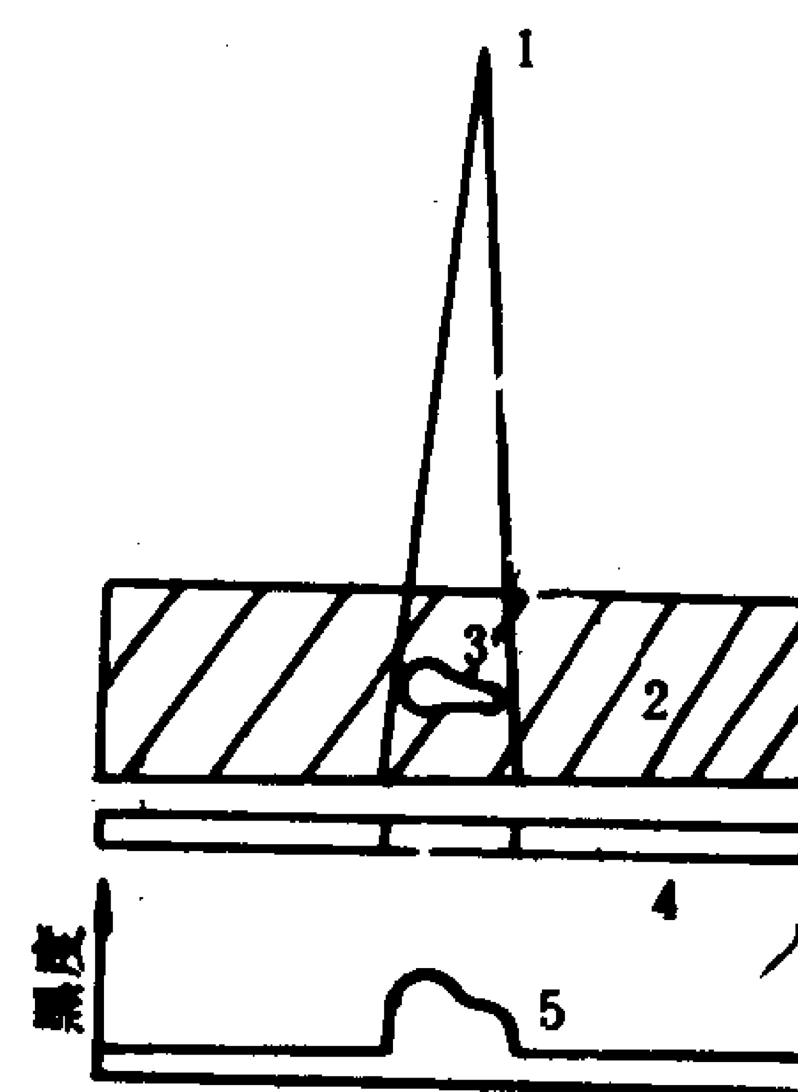


图 3.1.6-34 射线探伤原理
1-射线源；2-被照射工件；3-缺陷；4-感光胶片；5-胶片感光后的黑度

2)射线探伤应用

X射线探伤对钢材透射最大厚度为 100 mm。γ射线对钢材透射最大厚度 200 mm。射线探伤对被测工件表面没有特殊要求，但形状不能太复杂。这种探伤较易发现体积性的缺陷，如铸件中气孔、缩孔、夹渣，焊接件中夹层、夹渣。对于锻造、轧制、拉挤中的薄层状或缝隙状缺陷不易发现。

6.1.2 超声波探伤

1)超声波探伤原理

超声波为超出人的听觉范围的高频率振动波，超声波探伤用的波一般为 0.5～25 MHz。超声波具有强烈的指向性，可向不同介质作定向发射。当超声波遇到缺陷时，由于缺陷的声阻同工件的材料声阻相差很大，大部分的超声波能量被反射回来，利用接收放大器使荧光屏上显示出不同强弱的波形来发现缺陷的位置、性质、大小和形状。

2)超声波探伤应用

超声波探伤对钢材有效探测最大厚度可达 1 ～1.5 m，能发现直径为 1 mm或更小的缺陷，能检查出缝隙或薄层状的缺陷，如铸造裂纹、冷隔，锻造裂纹、折叠，热处理裂纹、白点、发裂，轧制发纹，焊接裂纹、未熔层、疲劳裂纹等。超声波探伤要求被测工件形状比较简单，表面要打磨光洁。

6.1.3 磁粉探伤

1)磁粉探伤原理

铁磁材料在磁场中被磁化后，表面或皮下的缺陷，如裂纹、非金属夹杂物等非磁性物质使磁力线不易通过，只能绕过缺陷，甚至使磁力线在缺陷两端产生N-S极，如图 3.1.6-35 所示。如在工件上敷上导磁性良好的磁粉，在缺陷处的磁粉被局部的磁极所吸引，堆积其上，

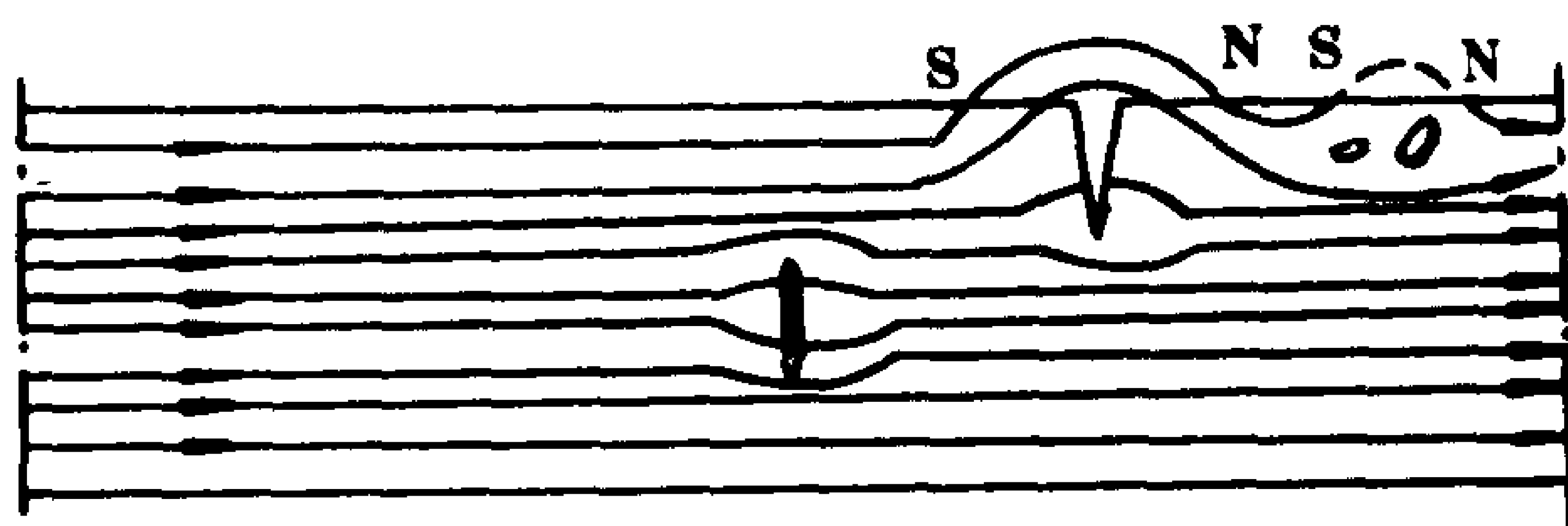


图 3.1.6-35 磁粉探伤原理

显示出缺陷的位置和形状。

2)磁粉探伤应用

磁粉探伤有效深度约为 1 ~2.5 mm，对表面裂纹很有效，灵敏度高，可以显示 0.01~0.2 mm宽的裂纹。对工件外形无特殊要求，只要求被测表面较光洁。用来检查表面细小的磨削裂纹、淬火裂纹、锻造折叠，焊接表面裂纹，发纹和浅层的夹杂物等。磁粉探伤无法发现超过几毫米深度的材料缺陷。

6.1.4 荧光探伤

1)荧光探伤原理

在被测工件表面涂上荧光物质的渗透剂，使其渗入表面开口的缺陷中，然后除去多余的渗透剂，再在表面涂一层显现剂，此时缺陷中残存的渗透剂被吸出，由于渗透剂含有荧光物质，于是在紫外线照射下即可观察到表面缺陷位置，大小和形状。

2)荧光探伤应用

荧光探伤检查表面开口的缺陷，宽度大于 0.01 mm，深度 0.02~0.03 mm内的各种裂纹和气孔、砂眼等。不仅适用于金属材料也适用于非金属材料，但是无法检查不开口的缺陷。

6.1.5 涡流探伤

1)涡流探伤原理

当交流电通过具有一定电感和电阻的线圈时，会有一定的阻抗。把被检的铁磁性工件放入线圈中，工件会被感应出周向电流、即涡流。由于涡流磁场与外加电流磁场方向相反，使线圈的阻抗，通过电流的大小和位向都会发生变化。如果使其他引起线圈阻抗变化的因素不变，仅仅接收工件中缺陷引起的阻抗变化信息，经放大处理和检测，就可探测到缺陷。

2)涡流探伤应用

涡流探伤能探测的深度为 0.11~0.2 mm，可以发现工件表面裂纹、折叠、夹杂物、凹痕等缺陷。检验速度快，易自动化，并且可以在现场进行，不必折卸工件。但不能探测较深的材料缺陷。

6.2 光学显微分析

光学显微分析是应用最广泛的材料质量分析方法，可以完成的检验有：显微组织，表层缺陷、表面处理层组织、晶粒度和均匀度、非金属夹杂物、表面裂纹、表面滑移带、较平坦的断口，表面磨损和腐蚀，显微硬度等。

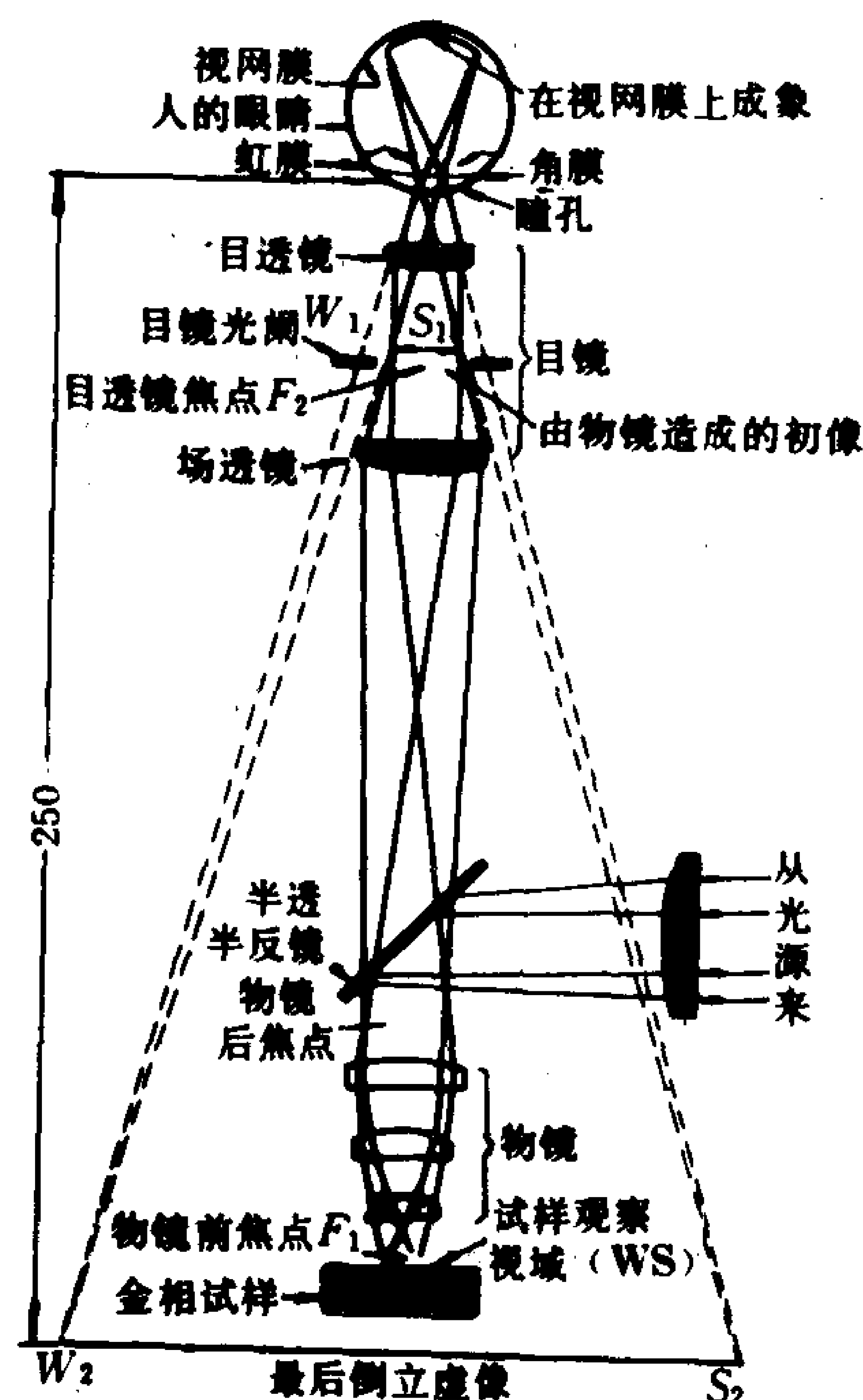


图 3.1.6-36 光学显微镜原理

1)光学显微镜原理

光学显微镜通过光学透镜，物镜，目镜和中间镜来放大成象，使人眼能观察到细微的结构，提高人眼的分辨能力。

光学显微镜原理如图 3.1.6-36 所示，由灯光照明，通过滤光片得到不同波长的光线，借助于棱镜或平面镜，将光线投射到被检验的试样表面上，依靠试样表面的反射能力，部分光线再进入物镜，经放大成为映象，映象反映了试样表面微区的形貌，通过目镜即可用眼睛观察或摄影。

由于光学显微镜都用玻璃透镜，光线在介面上的折射和散射，必然使映象变形歪曲而发生象差，因此光学显微镜的分辨率和放大倍数受到限制，有效放大倍数为 2000 倍，极限分辨率为光波长的一半，约为 0.2 μm。

被测表面常常用各种浸蚀方法来获得因组织不同而不同的浮雕。

2)光学显微镜用途

光学显微镜根据用途不同有各种专用显微镜，也可以根据用途配置专用附件，以扩大检验范围，如表 3.1.6-15 所列。

表 3.1.6-15　**光学显微镜附加装置及用途**

名　称	性　能　特　点	用　　途
暗场装置	采用入射角大角度倾斜，提高物镜鉴别能力，也提高了映象的衬度和清晰度	显示表面浮凸，鉴别非金属夹杂物的色彩，透明程度
偏光装置	利用入射光程内和观察筒内的附加偏振片，获得偏振光	显示组织晶粒及位向测定，相分析，夹杂物分析
相衬装置	利用相衬作用，使不同相的反射光线发生相互干涉或叠加，借以鉴别细微结构	显示各相形状和分布，鉴别表面微小的高度差（10～150 nm）如滑移带，表面微裂纹等
高温装置	装有高温加热，同时又在真空室中，以免样品氧化	高温下相组织、相变观察。高温蠕变和断裂分析
低温装置	装有低温真空室，使试样在低温下检验	低温相组织、相变观察如马氏体相变观察
显微硬度头	装有用弹簧加载的显微硬度头，和硬度指示标尺（维氏值）	测定相硬度、强化层硬度及梯度，组织和强化层脆性
图象分析仪	利用电视扫描原理，对图象中选定的特征：相组织、夹杂物、缺陷等的数目、面积百分数、平均尺寸、尺寸分布等用微机处理后给出	对相组成、晶粒和相的大小、分布、面积百分数作定量分析
断口分析台	装有夹持断口的装置，试样可以转动和倾斜，以便于聚焦	检验较平坦的断口，裂纹走向，周围组织，裂纹中填充物、疲劳源区或裂纹尖端情况

6.3　电子显微分析

金属和非金属材质分析检验以及断口分析，广泛地应用电子显微分析技术。电子显微分析用的仪器目前主要有透射电子显微镜和扫描电子显微镜，同时可配置各种探测器，探测器接收电束和试样作用后发射的各种特征信号，可对试样作微区化学成分的分析。

6.3.1　透射电子显微镜

1)透射电子显微镜的构造原理

透射电子显微镜的成象原理和光学显微镜相似，不同的是电子显微镜不用自然光源，而是在高压作用下电子枪发射的电子束，所采用的透镜不是光学玻璃而是电磁透镜，如图 3.1.6-37所示。电子束经聚光镜后平行地投射到试样上，穿过试样后被散射的电子束经物镜、中间镜和投影镜三级放大，在荧光屏上成象。在物镜后焦面处有物镜光栏，选择光栏孔的大

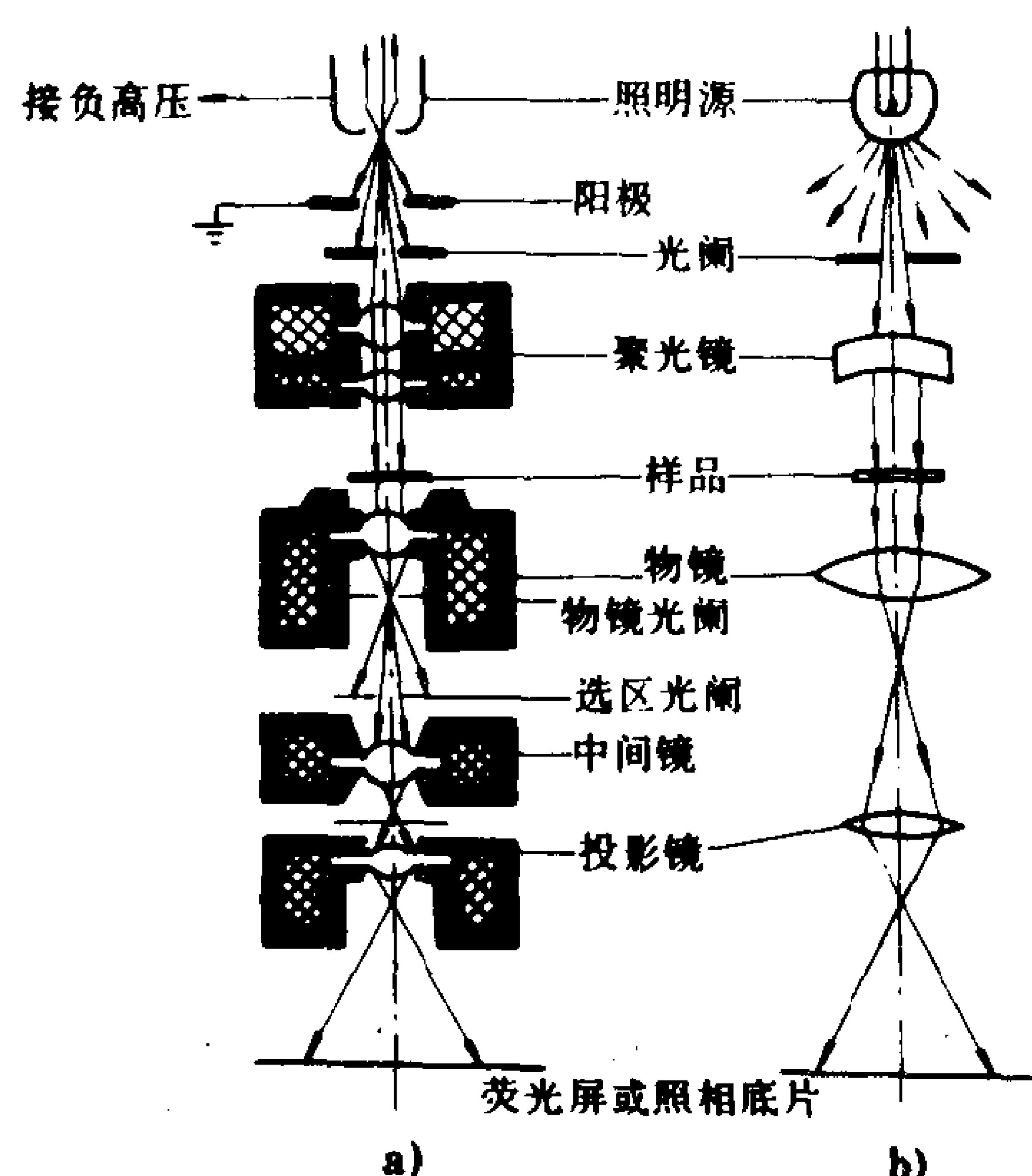


图 3.1.6-37 透射电子显微镜构造原理
a) 透射电子显微镜；b) 透射光学显微镜

小可控制电子束的入射孔径角，以获得最佳的象衬度和分辨率。在物镜象面处有选区光栏，以限制视场。改变中间镜电流使物镜后焦面成为中间镜象面，可得到选区电子衍射谱象。整个装置都在高真空封闭体内。

2)透射电子显微镜的应用

电子显微镜的发射电子束的波长很短，如加速电压 100 kV和 200 kV时，分别为 0.00392 nm和 0.00251 nm，又易于用电磁透镜聚焦的特点，因此分辨本领很高，其分辨率可达 0.3～0.2 nm，同时放大倍数也很高，达 100 万倍。电子显微镜的景深大，可达几十微米。透射电子显微镜通过各种制备样品技术和工作方式获得不同的应用，如表 3.1.6-16 所列。

表 3.1.6-16
透射电子显微镜工作方式及应用

工作方式	工作原理及试样	应　　用
薄膜透射形貌象	透射电子成象，试样直径为 3 mm，厚 100～200 μm薄片	金属式非金属组织，晶界析出第二相、时效析出物等形貌
电子衍衬技术	利用样品中金属晶体取向差异，形成各部位的透射束与衍射束强度不同，使成象中有明暗衬度	晶体缺陷和析出相的暗场象，利用基体弹性变形引起的衬度分析极细小的析出相，位错晶界、层错、滑移面等
电子衍射技术	电子束透过薄膜样品，当透射电子与金属晶体的晶面满足布拉格关系时，产生电子衍射象	金属单相晶体的结构分析，细微粒子的相结构分析如析出物，沉淀相，夹杂等
复型技术	在试样表面涂上碳或重金属薄膜把剥下的薄膜在电镜下观察形貌	组织形貌、析出相、断口、磨损表面、磨粒分析
萃取复型技术	选用一定的浸蚀剂，有选择性地保留要分析的粒子，并用喷涂的碳膜来萃取这些粒子	析出相的形貌、裂纹表面粒子、填充物的形貌和相结构分析

6.3.2 扫描电子显微镜

1)扫描电子显微镜的构造原理

扫描电子显微镜的构造原理如图3.1.6-38。由电子枪发射的电子束，经过聚光镜后在试样表面扫描，电束的轰击使试样表面激发出各种物理信号，电子收集器捕捉信号并转换成视频信号，经视频放大后用来同步地调制监视显象管电子束强度，在荧光屏上得到反映试样表面各种特征的扫描图象。

扫描电镜常用来试样表面或断口的形貌分析，其分辨率和景深随放大倍数变化，如表 3.1.6-17 所列。

电子束轰击试样表面产生的信号如图3.1.6-39所示，用探测器捕捉到的信号除作形貌分析外，还可以作化学成分和晶体结构分析。表3.1.6-18列出探测器可收集到的信号及其功用。探测器可以是专用微区分析仪器的部分，也可以作为扫描电镜的附件。

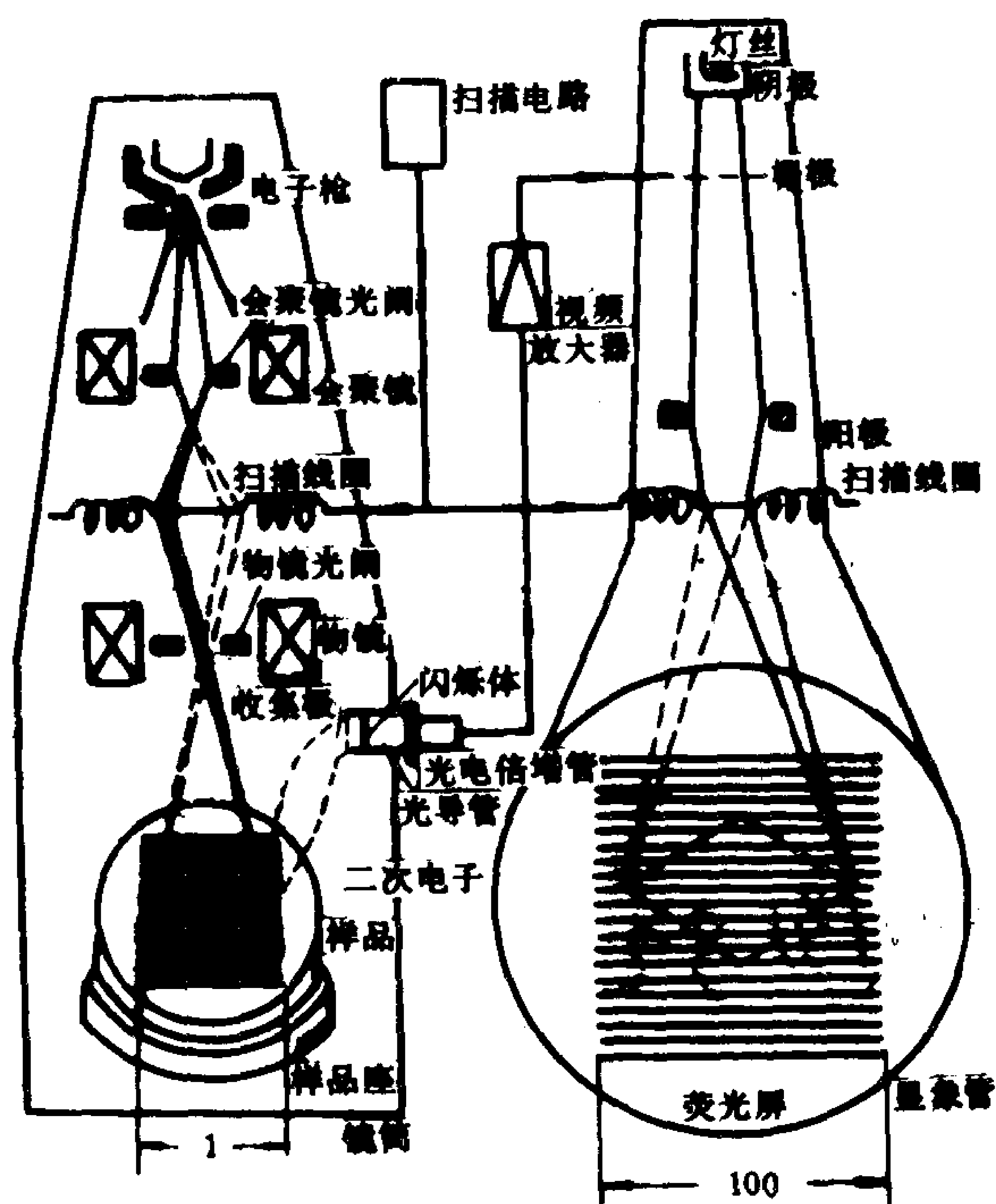


图 3.1.6-38　扫描电子显微镜构造原理

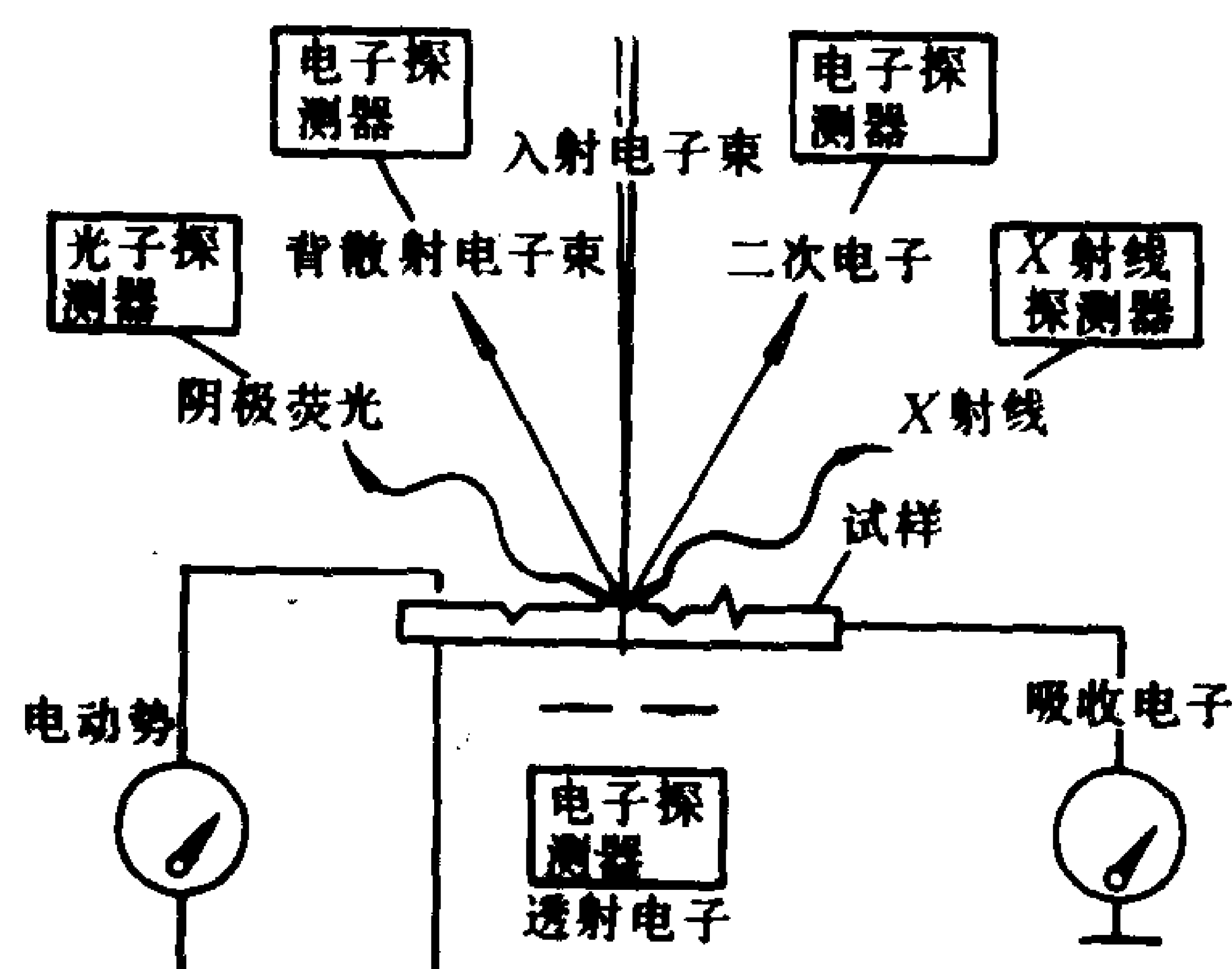


图 3.1.6-39　电子束轰击试样表面产生的物理信号

表 3.1.6-17　　扫描电子显微镜的放大倍数、分辨率和景深

放大倍数	分辨率（μm）	景　深（μm）	
		扫描电镜	光学显微镜
20	5	5000	5
100	1	1000	2
1000	0.1	100	0.7
5000	0.02	20	—
10000	0.01	10	—

表 3.1.6-18　　扫描电子显微镜收集的信号及功用

信号类别	功　用	空间分辨率
背散射电子	化学成分分析 晶体结构分析	100 nm 5～10 μm
二次电子	表面形貌分析	10 nm
X射线光子	化学成分分析	1 μm
俄歇电子	表面化学成分分析	1 μm
阴极发光光子	化学成分分析	100 nm
透射电子	晶体结构分析	1～10 nm

2)扫描电子显微镜的应用

扫描电镜具有比光学显微镜高得多的分辨率（10～ 3 nm）和放大倍率，又具有比透射电镜更宽的放大倍率范围（5 到 30 万倍）和大得多的景深（10～1000 μm），物镜光栏到试样的

工作距离很大(10～25 mm)，加之是利用电子束扫描成象。因此可以分析较大的试样或工件，试样或工件可以在工作室中作三维转动。以上特点使扫描电镜不仅可以用于材质分析，还成为断口分析的主要仪器。现代扫描电镜都配置X射线探测器，这样使电镜作形貌分析的同时还可以作微区化学成分定性和定量分析，见表 3.1.6-19。

表 3.1.6-19 扫描电子显微镜的应用

分析名称	特点	应用
表面形貌分析	利用二次电子探测器，图象清晰立体感强，可以直接观察，不需作复型，可以从低倍普查到高倍分析分辨率可达 3 nm	浸蚀样品的电子金相分析、断口分析、裂纹分析、磨面分析、磨粒分析等
表面化学成分分析	利用X射线探测器。确定金属激发的X射线波长的波谱，可以分析氢、氦、锂以外的所有元素；确定激发的X射线光子能量的能谱，可以分析原子序数钠以上的元素；对样品无特殊要求；分析速度快、可直接在屏幕上显示谱线，也可用电传打字给出定性和定量数据	金相试样、断口的微区化学成分分析、粉末和磨粒化学成分分析，包括确定组成元素的含量和分布情况
晶体结构分析	利用电子通道花样，可以在 10 μm范围内分辨精细结构	晶体取向、结构特征位错、缺陷等分析
动态分析	利用拉伸样品台，对试样在受力过程中的变形、裂纹形成和扩展作动态观察	断裂过程研究

6.4 内应力分析

零件在生产过程中或使用过程中都会产生内应力，如铸件、热处理件不均匀冷却引起的热应力和相变不均匀引起的组织应力，拉挤、冲压、切削加工中不均匀变形引起的内应力等。

零件中存在的内应力通常称为残余应力，可分为宏观内应力，也称第一类内应力；微观内应力，也称第二类内应力；超微观内应力，也称第三类内应力。宏观内应力存在于零件或结构件的区域之间，微观应力存在于材料的微区之间，如晶粒之间，超微观应力存在于晶粒内部。内应力使零件在受力时改变了应力分布，也会加剧应力集中程度，因此可能使零件发生变形和失去尺寸稳定性。第二第三类内应力使金属抗腐蚀能力下降，开裂脆向增大。

为了确定内应力的种类、大小和分布，现代分析方法主要采用X射线应力分析。

6.4.1 宏观内应力分析

测定宏观内应力有机械法、磁性法、超声波法和应力涂料法，常用的为X射线法。

1)X射线测定应力的原理

一束波长为λ的特征X射线照射到面间距为d的金属晶体试样上，由于X射线波长和晶体的面间距为同一数量级，故晶体起着光栅作用而使X射线发生衍射，如图 3.1.6-40 所示，当满足布拉格公式：

$$\lambda = 2\,d\sin\theta \tag{3.1.6-13}$$

式中：θ——λ射角；

λ——X射线波长；

d——晶体面间距。

衍射处于由入射线和晶面法线所构成的平面内，微分布拉格公式得：

$$\frac{\Delta d}{d} = -\mathrm{ctg}\theta \cdot \Delta\theta \tag{3.1.6-14}$$

由此可见如能测出任一方向上衍射角的变化$\Delta\theta$，便可测定晶面间距的变化$\frac{\Delta d}{d}$。$\frac{\Delta d}{d}$即为应变，由弹性力学可以算得引起任一方向的平面应力σ_1和σ_2。

2)X射线应力测定的计数管法

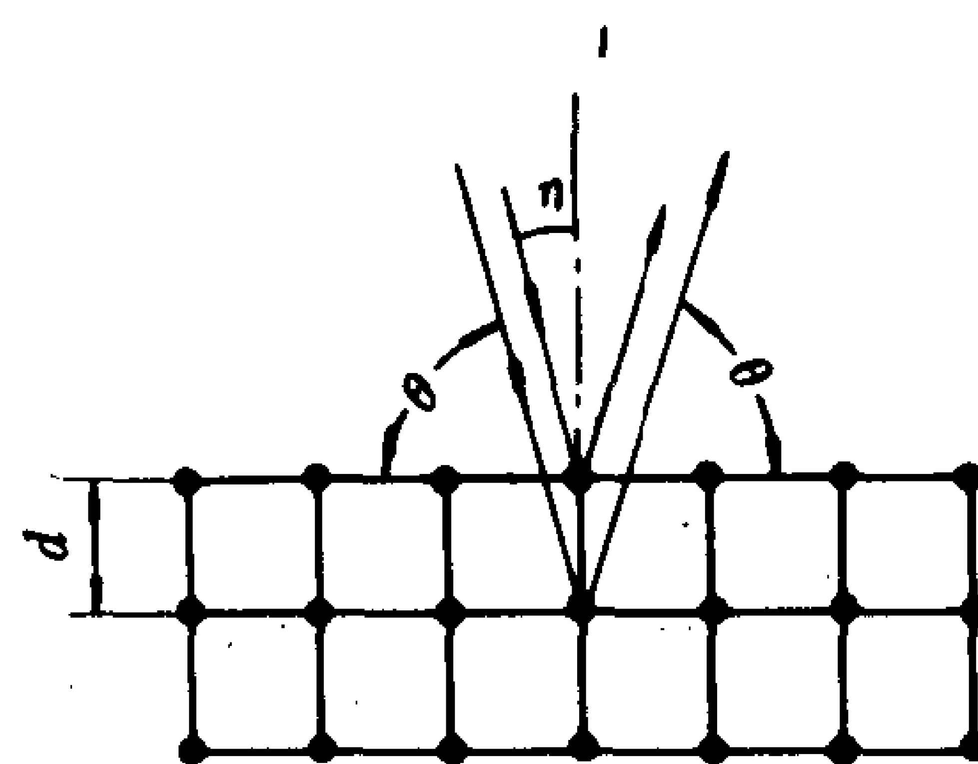


图 3.1.6-40　X射线衍射原理

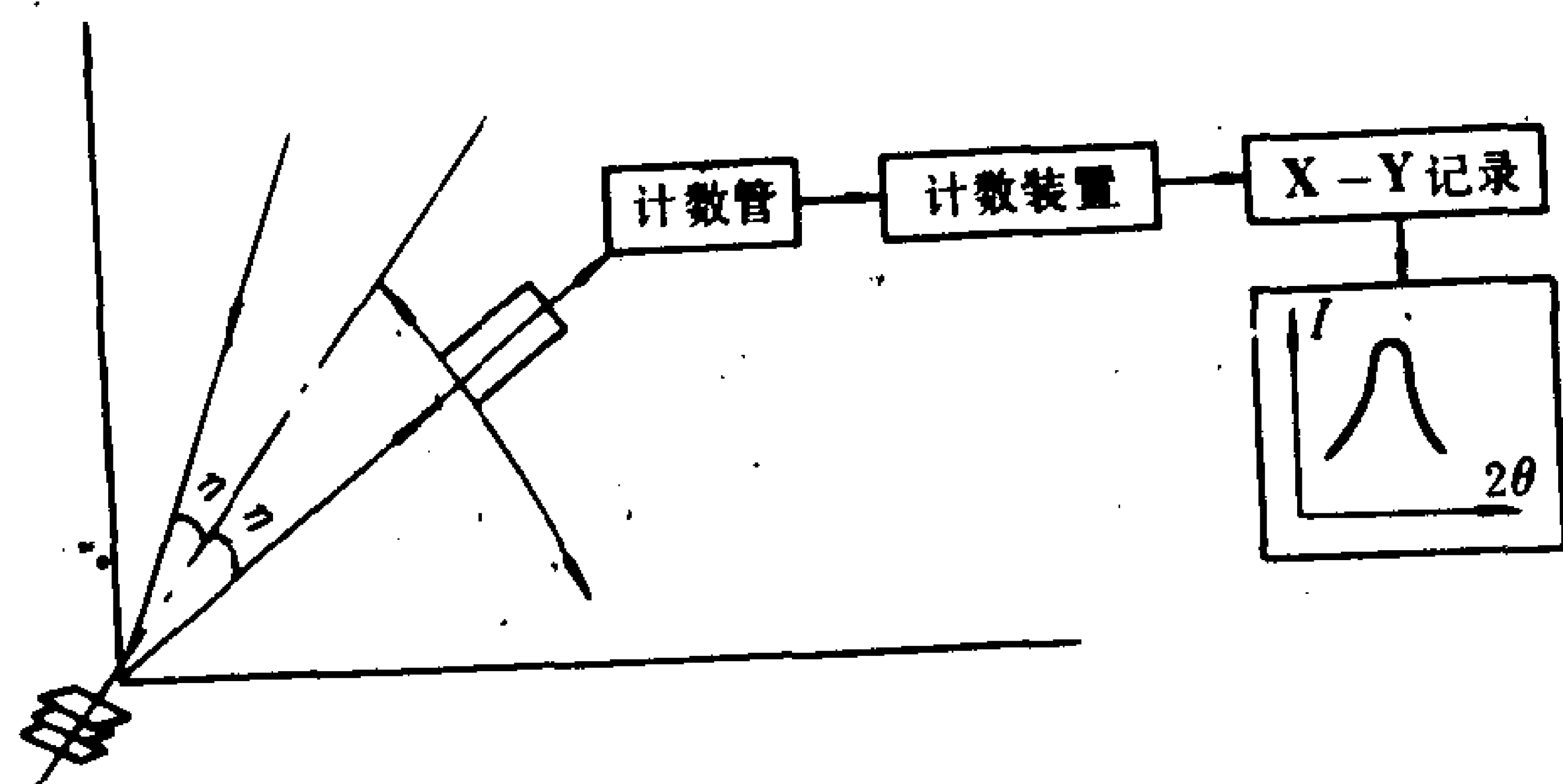


图 3.1.6-41　计数管法测定表面应力

专用X射线应力测定仪中，测角台能使入射线从0°到45°范围内倾斜入射，用计数管检出衍射线，并通过计数装置与$x-y$记录仪给出衍射强度曲线，如图3.1.6-41。通常根据记录的衍射曲线找出衍射峰的精确数值，从而测出对应的2θ值即可计算出表面应力大小

3)X射线测定应力的应用

X射线贯穿深度为百分之几毫米，因此切削、磨削、喷丸、挤压、电镀、焊接、热处理、表面强化处理等工艺造成的内应力均可直接测定。为了使测定精确，必须把表面氧化皮、油污、腐蚀物除去，必要时用砂纸打光后再电解抛光。

由于不同特性X射线测出的应力值稍有不同，仪器测量条件也影响测定精度，因此每个测定应力值必须给出所选用的X射线发射靶、X射线管压、管流、光栏、时间常数、扫描速度等条件参数。

6.4.2　微观内应力分析

微观内应力是几个晶粒范围内的应力，和零件的尺寸形状无关，同一个零件的两个微观区域内的应力大小和方向可能都不同。因为晶粒的变形大方和方向各不相同，有的晶粒的晶面间距变大，而另一些晶粒的面间距可能变小，并且变化程度也不同，结果导致衍射线条的宽化。

测量时，必须用一个与被测试样成分相同，完全消除了内应力的标样作比较(通常用充分退火方法)。试样同标样在一台应力分析仪上测量X射线衍射曲线，如图3.1.6-42所示，然后测出试样的衍射曲线的平均半高宽和标样的衍射曲线的半高宽，根据下式求得平均内应力σ_a:

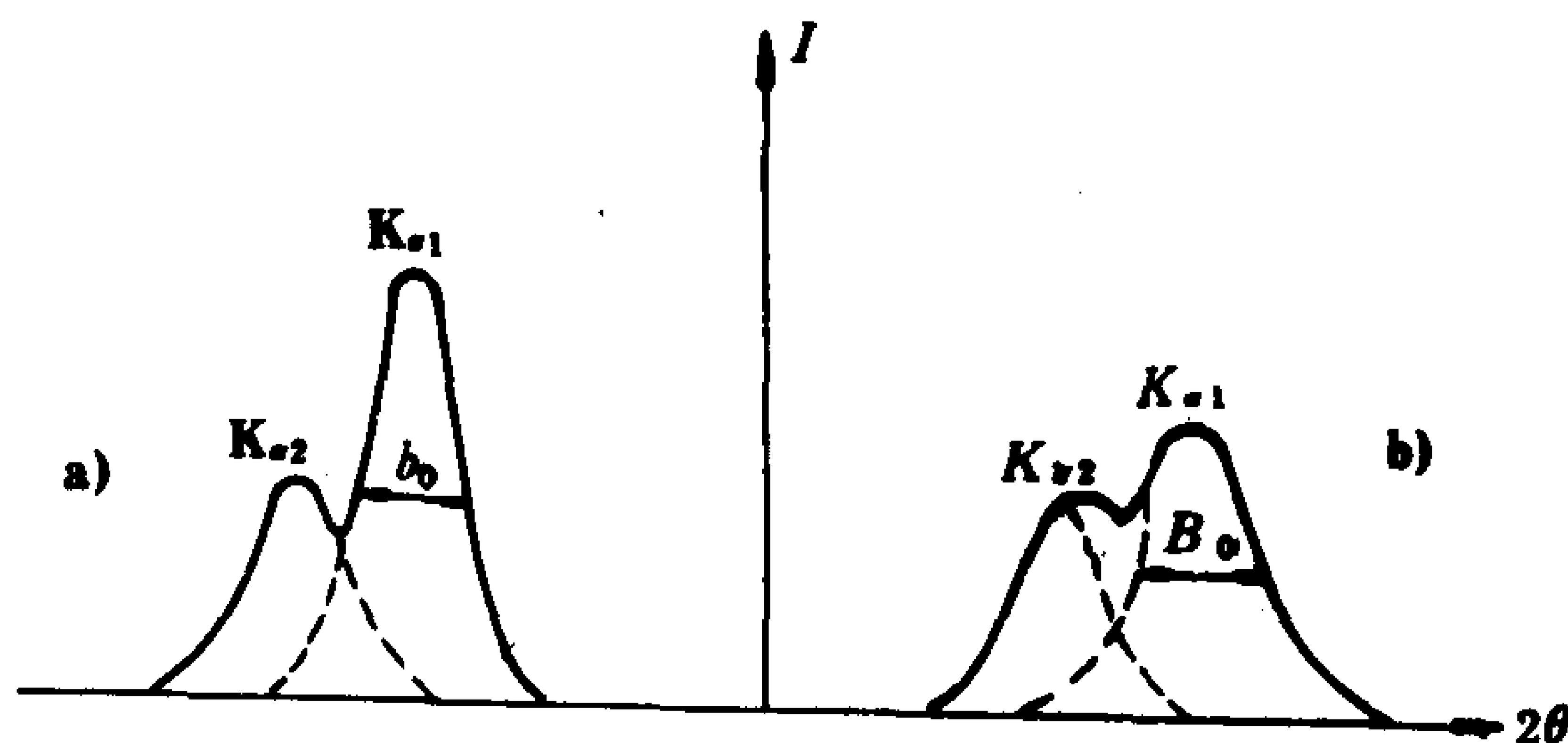


图 3.1.6-42　X射线衍射曲线

a) 标样；b) 试样

$$\sigma_a=\frac{E\cdot B}{4}\text{ctg}\theta \qquad (3.1.6\text{-}14)$$

式中：E——晶体弹性模量；

B——真实加宽量，$B = B_0 - b_0$；

θ——衍射角。

其中：B_0——试样衍射曲线半高宽；

b_0——标样衍射曲线半高宽。

6.4.3 超微观内应力分析

超微观内应力为晶粒内部的位错应力。当金属受到塑性变形时，沿晶体滑移面附近分布着很多位错，位错附近的晶格受到强烈的畸变，使原子偏离稳定平衡位置。这种畸变约在数千个或只有数百个原子的极微小的区域内存在。原子偏移平衡位置的偏移量为正常原子间距的百分之一至千分之一。由于原子偏移使照射进的X射线散射，导致X射线衍射条强度减弱，因此可通过测定X射线衍射条强度的方法来测定超微观内应力的大小。

第 7 章　金属材料的腐蚀与保管

1　金属腐蚀的原因和种类

当金属和周围介质接触时，由于发生化学作用或电化学作用而引起的破坏称为金属的腐蚀。

1.1　化学腐蚀

单纯由化学作用而引起的腐蚀叫做化学腐蚀。温度对化学腐蚀影响很大。钢铁与空气中的氧气在 150℃ 以下不易发生作用。钢铁在氧化过程中，在温度低于 570℃ 的情况下，生成以四氧化三铁为主的氧化层，它具有致密结构，起到保护层的作用。570℃ 以上生成以氧化亚铁为主的氧化层，腐蚀速度加快。

钢铁中加入一些合金元素，如铬、铝、硅等，这些元素与氧结合能力很强，形成氧化铬、氧化铝、氧化硅等氧化物，它们的结构致密，又能完整而牢固地与钢铁基体表面金属结合，起到阻止氧和金属离子（原子）通过的作用，从而使金属被氧化的反应不能继续进行。

1.2　电化学腐蚀

当金属和电解质溶液接触时，由电化学作用而引起的腐蚀称为电化学腐蚀。被腐蚀金属为原电池的阳极（负极），发生氧化反应时，变成金属离子溶入溶液。

由于钢铁表面的电化学不均匀性，处于海水和河流湖泊水中的钢铁形成腐蚀电池，钢铁发生电化学腐蚀是显而易见的事，即使处于大气中的钢铁，由于钢铁表面吸附着一层水膜，水膜中溶解空气中的二氧化碳、二氧化硫气体，以及盐雾、灰尘、烟灰等形成电解质溶液，也形成腐蚀电池，导致钢铁发生电化学腐蚀。

在大气、淡水和海水等中性或极弱酸性水溶液中，钢铁主要发生吸氧腐蚀。

阳级 $Fe-2e=Fe^{2+}$

阴极　$O_2+2H_2O+4e=4OH^-$

腐蚀反应 $2Fe+O_2+2H_2O=2Fe^{2+}+4OH^-$

腐蚀反应生成的 Fe^{2+} 进一步反应形成铁锈。

钢铁在酸性介质（$pH<4.3$）中将发生析氢腐蚀。

阳极（铁）　$Fe=Fe^{2+}+2e$

$Fe^{2+}+2OH^-=Fe(OH)_2$

阴极（杂质）　$2H^++2e=H_2$

总反应方程式 $Fe+2H_2O=Fe(OH)_2+H_2\uparrow$

$4Fe(OH)_2+2H_2O+O_2=4Fe(OH)_3$

$2Fe(OH)_3=3H_2O+Fe_2O_3$(红褐色铁锈的主要成分)

金属表面常因氧气分布不均匀而引起差异充气腐蚀。它是吸氧腐蚀的一种。氧气浓度不同的两处根据氧的电极反应为 $O_2+2H_2O+4e\rightleftharpoons 4OH^-$，运用能斯特方程 $\varphi=\varphi^0+\frac{0.059}{n}\lg$

$\frac{[\text{氧化态}]}{[\text{还原态}]}$，式中$\varphi$为指定浓度的电极电位，$\varphi^{\circ}$为标准电极电位。联系上述电极反应，则 $=\varphi^{0}_{O_2/OH^-}+\frac{0.059}{4}\lg\frac{P_{O_2}}{[OH^-]^4}$。氧气分压越大，相应的电极电位越大。这样，由于两处氧气浓度不同而形成了浓差电池，其中氧气浓度大的部位为阴极，氧气浓度较小的部位为阳极而被氧化受到腐蚀。

1.3 氧去极化腐蚀

电化学腐蚀是电池作用的结果，腐蚀过程中产生的电流的大小可以代表腐蚀速度。根据欧姆定律：

$$I=\frac{\varphi_{阴}-\varphi_{阳}}{R}$$

式中：I——腐蚀电池的电流；

$\varphi_{阴}$、$\varphi_{阳}$——分别为阴、阳极的电极电位；

R——腐蚀系统总电阻。

R一定时，腐蚀电流强度应与电池的阴、阳极电极电位差成正比。但是，单独测定的阴极电极电位和阳极电极电位（没有接通的情况下，无电流时测定的值）与接通电池后的阴极电极电位和阳极电极电位值是不相同的，在接通电池后的短时间内，由于系统中有电流通过而造成电极电位的改变，使得阳极的电位升高而阴极电位降低，其差值减小，称为电极极化。由于电极极化降低了金属的腐蚀速度。阳极电位的升高称为阳极极化；阴极电位的降低称为阴极极化，极化后电极电位与原来电极电位差值称为过电位。

产生阳极极化的主要原因是，在腐蚀过程中阳极表面上产生了有保护作用的腐蚀产物膜，它阻止了金属溶入溶液，因而提高了阳极的电极电位。阴极极化的主要原因是，浓差极化及电化学极化。

在中性的电解质溶液中，在有氧存在的弱酸性溶液以及在潮湿空气中的腐蚀，主要都是氧去极化腐蚀，对腐蚀速率起重要作用的是金属表面上保护膜的性质和溶液中氧到达阴极表面的难易程度。

2 腐蚀的形态

根据腐蚀的金属外形可分为8种形态。每种形态仅凭表观观察就能鉴别。腐蚀的形态中有些是独特的。但它们都或多或少地互相关联着。

2.1 均匀腐蚀或全面腐蚀

均匀腐蚀是最常见的腐蚀形态。化学或电化学反应在全部暴露的表面或大部分面积上均匀地进行是均匀腐蚀的一般特征，金属变薄了，最后破坏。

防止或减少均匀腐蚀可采取1）合适的材料，包括覆盖层；2）缓蚀剂；3）阴极保护。这些方法可单独使用或联合使用。

2.2 电偶腐蚀或双金属腐蚀

当两种不同的金属浸在腐蚀性或导电性的溶液中时，两金属之间通常存在着电位差。如

果这些金属互相接触（或用导线连通），该电位差使电子在它们之间流动。与不接触时比较，这时耐蚀性较差的金属在接触后腐蚀通常增加，而较耐蚀的金属腐蚀则下降。耐蚀性较差的金属变为阳极，耐蚀性较高的金属则变为阴极。在这类偶接形式中，阴极或阴极性金属的腐蚀往往很小或完全不腐蚀。这类腐蚀形态因为涉及电流和不同金属，所以称为电偶或双金属腐蚀。

防止或减轻电偶腐蚀的措施有：

（1）选择组装在一起的金属时，要选那些在电位序中尽可能靠近的品种。

（2）避免小阳极和大阴极的不利面积效应。

（3）切实可行的方法是使不同的金属互相绝缘。

（4）要维护好涂料涂层，特别是阳极部位。

（5）加入缓蚀剂。

（6）安装一块比电偶接触的两种金属都更负的第三种金属。

2.3 缝隙腐蚀

浸在腐蚀介质中的金属表面上，在缝隙和其它隐蔽的区域内常常发生强烈的局部腐蚀。这类腐蚀常和孔穴、垫片底面、搭接缝、表面沉积物以及螺帽和铆钉帽下的缝隙内积存的少量静止溶液有关。因此这种腐蚀形态称为缝隙腐蚀，有时也称为沉淀物腐蚀或垫片腐蚀。

防止或减少缝隙腐蚀的方法有：

（1）新设备用对接焊，而不用铆或螺栓连接。

（2）搭接焊的缝隙，要用连续焊，钎焊或捻缝的方法将其封塞。

（3）尽可能使用整的不吸水的垫片。如聚四氟乙烯。

2.4 孔蚀

孔蚀是在金属上产生小孔的一种极为局部的腐蚀形态。一般蚀孔可以描述为表面直径等于或小于深度的洞穴。

孔蚀是破坏性和隐患最大的腐蚀形态之一，防止缝隙腐蚀的方法一般也适用于防止孔蚀。

2.5 晶间腐蚀

晶间腐蚀是由晶界的杂质，或晶界区某一合金元素增多或减少而引起的。当晶界或其邻近产生局部腐蚀，而晶粒的腐蚀则相对很小，这就是晶间腐蚀。这时合金破裂，同时丧失强度。

控制或减轻奥氏体不锈钢的晶间腐蚀的方法有：

（1）采用高温固溶处理，一般也称为淬火。

（2）加入强碳化物生成元素（称为稳定剂）。

（3）降低碳含量至0.03%以下。

2.6 选择性腐蚀

又称选择性浸出。是由于腐蚀过程而从一种固体合金中除去其中一种元素。例如，灰口铸铁中石墨对铁为阴极，形成高效腐蚀原电池。铁溶解，剩下由石墨、孔隙和锈构成的多孔体，使铸铁失去了强度和金属性能。因表面外观象石墨，它也称为石墨化腐蚀。

降低介质的侵蚀性（如去氧）或用阴极保护可以减轻这类腐蚀。

2.7 磨损腐蚀

由于腐蚀流体和金属表面间的相对流动。引起金属的加速破坏或腐蚀。一般这种运动的速度很快，同时还包括机械磨损或磨耗的作用。金属以溶解的离子状态脱离表面，或是生成固态腐蚀产物，而后受机械冲刷脱离金属表面。

防止磨损腐蚀的方法有：

（1）选用耐磨损腐蚀较好的材料。

（2）改进设计。

（3）改变环境。

（4）涂层。

（5）阴极保护。

2.8 应力腐蚀

应力腐蚀破裂是指拉应力和一种特定腐蚀介质共同存在而引起的破裂。金属或合金发生应力腐蚀破裂时，大部分表面实际不遭腐蚀，只是有一些细裂纹穿透内部。

应力腐蚀破裂的机理还不完全明白。因此，防止方法还只是一般性的或经验性的。

（1）如果存在临界应力值，就将应力降低到此值以下。

（2）除去危害性大的介质组成。

（3）如果不能改变环境或应力，则可改变合金。

（4）利用外电源或牺牲阳极对结构施加阴极保护。

（5）如可行时，加入缓蚀剂。

3 金属腐蚀的防护

3.1 缓蚀剂法

缓蚀剂是一种能阻止或减缓氧化还原反应的物质。因此，缓蚀剂是加入介质中能降低金属腐蚀速度的物质。

缓蚀剂分为无机缓蚀剂和有机缓蚀剂两类。无机缓蚀剂的作用主要是在金属表面形成氧化膜或难溶物质。有机缓蚀剂对金属缓蚀作用的机理较复杂。最简单的一种机理认为缓蚀剂吸附在金属表面上，阻碍了氢离子的放电，因而减缓了腐蚀。

在腐蚀性介质中，加入少量能减小腐蚀速度的物质来防止腐蚀的方法称为缓蚀剂法。

在锅炉中加入挥发性的碱性化合物，如吗啉或乙二胺，利用它的蒸气中和酸性的二氧化碳，可以防止冷凝器管的腐蚀。这类气相缓蚀剂是通过使介质变成碱性来抑制腐蚀的。

3.2 阴极保护法

1)牺牲阳极保护法

将较活泼的金属或其合金连接在被保护的金属上，形成原电池。这时较活泼金属(如铝、锌及它们的合金）作为腐蚀电池的阳极而被腐蚀，被保护的金属得到电子作为阴极而达到保护的目的。

2)外加电流法

将被保护金属与另一附加电极作为电解池的两个极。被保护金属为阴极，在直流电的作用下阴极就受到保护。

3.3 金属材料保管中的防护

3.3.1 水剂防锈

防锈水剂是由水及缓蚀剂组成。用于工序间防锈及封存防锈。

常用的防锈缓蚀剂有亚硝酸钠、三乙醇胺、苯甲酸钠、铬酸盐等。前两种，只适用于钢铁件；后两种可用于钢铁及铜等非铁金属。配制时还常加入碳酸钠、稠化剂（指甘油、羧甲基纤维素、淀粉等稠化水剂的物质）等辅助添加剂。

此法可冷涂、热涂、全浸、喷淋。制品在处理前，必须洗净。

3.3.2 油料防锈

防锈油料是以矿物油或合成油为基础，添加油溶性缓蚀剂和辅助添加剂所配成。基础油料可选用不同滴落点的凡士林或不同粘度的机械油。合成油则用于配制要求较高的润滑防锈两用油。

在清洗或除油时，如果使用挥发性溶剂，必须有通风换气装置，对可燃溶剂，并应有安全防火措施。

1)常用的油溶性缓蚀剂

辅助添加剂有乳化剂、分散剂、润滑剂、抗氧化剂等。常用的油溶性缓蚀剂如表 3.1.7-1

表 3.1.7-1　　**常用的油溶性缓蚀剂**

类　别	实　　　　例
磺酸盐类	石油磺酸钡、石油磺酸钙、碱式石油磺酸钙、石油磺酸钠、二壬基萘磺酸钡等
羧酸及其衍生物	烯基丁二酸、油酸及其衍生物、环烷酸锌、硬脂酸铝、氧化石油脂及其钡皂等
酯类及其衍生物	羊毛脂、羊毛脂镁皂、羊毛脂磺化物、山梨糖醇酐单油酸脂等
胺类及其衍生物	烷胺，N-油酰基肌氨酸十八胺盐，酰胺类等
硫氮杂环类	苯骈三氮唑，烯基咪唑啉的十二烯基丁二酸盐， 2-硫基苯骈噻唑、烷基磷酸咪唑啉盐， N-N-双（苯骈三氮唑亚甲基）月桂酸等

2)防锈油料品种

防锈油料品种见表 3.1.7-2。

3.3.3 气相防锈

气相防锈剂在常温能缓慢地挥发，扩散到金属的表面而对金属起防锈作用。

常用气相防锈材料有：碳酸铵、磷酸氢二铵、尿素、六次甲基四胺、苯甲酸铵、碳酸单乙醇胺、苯甲酸单乙醇胺、亚硝酸二环己胺、碳酸环己胺、邻硝基酚四乙烯五胺、苯骈三氮唑等，这些材料有的可单独使用，有的是配合使用的。

在使用气相防锈材料包裹制品时，应全部包裹好，凡进入包装内的空气，必先经过气相防锈剂而后到达制品表面。气相防锈材料应储存于阴凉处，避免变质。

气相防锈材料的使用方式有：

（1)粉末法　直接使用或装在布袋内，用量视密封程度与防锈期而不同，用量一般为 35～52.5 g/m^3。工序间防锈在气相罩及气相柜内进行。

表 3.1.7-2　　常用防锈油料品种

品　种	性　能	用　途
防锈切削油	具有防锈性能的切削用油	金属切削加工
防锈切削乳化油	加水配成乳化液，具有防锈、清洗冷却及润滑性能	金属切削加工
防锈乳化油	加水配成乳化液，特点是具有极压润滑性能	金属挤压，车、铣、攻丝等重切削加工
置换型防锈油	Ⅰ型：具有置换、防止及洗净手汗的性能 Ⅱ型：具有置换水膜的性能	工序间和封存防锈及封存前清洗 水剂清洗后的工序间和封存防锈
溶剂稀释型防锈油	用碳氢系溶剂稀释的，含有成膜材料的防锈油料。溶剂挥发后成膜，分软膜型和硬膜型	封存防锈
乳化型防锈油	加水配成乳化液，水挥发后留下油膜，安全、价廉	水剂清洗后的工序间和封存防锈
油膜型防锈油	常温时能流动的防锈油料，油膜薄而透明	封存防锈
防蚀脂	以凡士林为基体的防锈油料	封存防锈
防锈润滑油	具有一定的防锈性能的润滑防锈两用油	发动机、齿轮箱等产品的润滑部位，作试车油、封存防锈油
防锈润滑脂	具有一定防锈性能的润滑防锈两用油	机械制品转动润滑部位，如双面带防尘盖轴承内所填的防锈润滑脂

（2）浸涂法　将溶解于蒸馏水或有机溶剂的气相防锈剂，涂覆于防锈纸或布上使用。用量为 12～15 g/m^2。使用方法可直接包装、衬垫或剪碎后撒在包装内。

（3）气相防锈油法　将含有气相防锈剂的防锈油，灌注于密封腔体内，如齿轮箱、内燃机气缸等。对接触与不接触气相油的部位，都有防锈作用。

（4）溶液法　以气相防锈剂溶液喷洒或涂覆产品，或浸润包装箱内的衬板或防震材料。涂有气相防锈液的工件，常用浸涂同样溶液的纸包装。

（5）气相塑料法　用附有气相防锈剂的透明塑料薄膜包装产品，能防锈，且透明直观。

3.3.4　防锈包装

金属制品即使在生产过程中及最终封存时都使用了合格的防锈材料及合理的工艺，但内外包装不合理，产品仍然会生锈。

1）常用的一些内包装材料

凡与产品直接接触的材料，应无腐蚀性。不与产品直接接触的，不可放出有腐蚀性的气体。常用的一些内包装材料见表 3.1.7-3。

表 3.1.7-3　　常用的一些包装材料

分　类	材 料 名 称
原纸	羊毛纸、电容器纸、中性原纸等
防锈纸膜	苯甲酸钠纸、气相防锈纸、气相防锈塑料复合纸、气相塑料薄膜等
防潮防水纸膜	中性石蜡纸、聚乙烯薄膜、聚氯乙烯薄膜、塑蜡复合纸、塑料复合纸、金属箔、铝塑薄膜、浸胶布等
容器	纸盒、木盒、塑料容器、金属容器等
干燥剂	硅胶、分子筛等
衬垫材料 胶带	绒布、丝绒、羊毛毯、泡沫塑料、充气塑料垫、纸屑、塑料丝等 压敏胶带

2)防锈包装方法

(1)涂覆防锈剂后，加以适当的包装。

(2)浸泡于装在密封容器的防锈剂中。

(3)涂覆可剥性塑料。

(4)气相防锈时，应辅以一定的密封包装。

(5)泡状包装，制品放在预制成型的透明膜内，然后密封。

(6)贴体包装，塑料膜加热后，落于制品上，真空成型密封。

(7)干燥空气封存包装。

(8)充氮封存包装。

第8章　金 相 技 术

金相技术通常包括宏观和微观组织检查，它是控制原材料及热加工质量和分析机器零件早期失效原因的有效方法之一，也是广泛用作对金属材料和热加工工艺进行常规检查和试验研究的重要手段。

1　金相样品的制备技术

金相试样的制备，一般有五道主要操作步骤：取样、镶嵌、磨光、抛光和腐蚀。

对金相试样的要求是：

1）有代表性或符合有关标准中明确规定的切取部位和数量。

2）截取、磨光和抛光中，由机械变形引起的扰乱或流动金属层最小。

3）无抛光道痕、凹坑及污染。

4）保持夹杂物完整。

5）高倍下检查足够平坦和高度光洁。

1.1　取样

取样部位依材料的特点及检验的目的不同而不同，所选取的试样必须具有代表性，要充分地代表被检验材料的组织特点。一般取横截面，主要观察试样边缘到中心部位显微组织的变化，检查试件表面缺陷(如脱碳、氧化、过烧、折叠等)、表面淬火硬化层、化学热处理渗层、镀层和晶粒度等；取纵截面主要观察非金属夹杂，测定晶粒变形程度、白点裂纹和鉴定带状组织等。对于铸件，必须从表面到中心，从上部到下部观察组织差异及可能产生的缩孔、疏松和冷却速度对组织的影响。铸件上应按规定专门铸有金相试样，如柴油机缸套、活塞体、套筒等铸件可在铸件毛坯加工面的上端 30 mm处取样，这可以比较确切地反映铸件的实际组织。

试样一般可用锯、砂轮切割机等切取试样。切割试样时要不断喷水冷却，以免切口附近组织受热变化，对于铝合金和铜合金，由于很软，切割面离观查部位要有一定的距离，然后通过磨光和抛光去除因切割而引起的变形金属层。

1.2　制样

1）试样镶嵌

对于薄小试样，磨光、抛光常需要采用夹持、镶嵌等方法。对于形状规则的试样采用夹持方法；对于形状不规则的试样则采用镶嵌法。

用夹具夹持试样，夹板一般用低碳钢板制做，用螺钉将试样夹起来。夹持时，中间垫片一般可用铜和镍等薄片，垫片的电极电位应高于试样，使它在腐蚀试样时不被腐蚀。

镶嵌方法是在镶嵌压力机上用酚醛树脂、聚氯乙烯等镶嵌试样，热压温度为 110～130℃。对于不能承受热压力的试样，采用室温下凝固的环氧树脂和松香进行冷镶嵌，为了保护试样边缘，可以在镶嵌座中加入支撑材料，支撑材料应是与试样相同的材料。

在金相检验中要求特殊保护的试样磨面边缘，可以预先进行电镀，电沉积处理。

2)试样的磨光和抛光

磨光、抛光是金相制样工作中极为重要的操作。试样制作的质量直接关系到检验结果的准确性。

金相试样的磨光，采用砂轮粗磨，并铅依次用 150～600 目砂纸研磨，每更换一次砂纸需将试样清洗干净。研磨铝合金、铜合金及铅合金时，为避免磨料嵌入，砂纸上可涂煤油或石蜡油。对于灰口铁、球墨铸铁及可锻铸铁，最后一道砂纸要干磨，以保护石墨。

抛光是得到一个平坦、无道痕、光亮如镜的试样表面的最后步骤。抛光方法有手工抛光、自动抛光、化学抛光、电解抛光等。少量试样一般采用手工抛光，针对不同材料及组织选用适当的抛光粉(氧化铝、氧化铬、氧化镁、金刚石膏等)，将其与水配成悬浮液或调成浆状使用。抛光时，先用无毛织物预抛或粗抛，随后用有毛织物（如丝绒）精抛，可以获得较好的效果。

3)试样显微组织的显示

首先应在抛光状态下检查金相试样，观察非金属夹杂物、疏松、缩孔、裂纹和其它缺陷，铸铁中的石墨、铝合金中的硅相、铜中的氧化铜和铅颗粒以及钢和铸铁中的钒和钛的碳氮化合物等。

然后，用一定的方法显示显微组织。显示显微组织的方法有化学浸蚀法、电解浸蚀法、表面氧化法、阴极真空显示法、磁性组织显示法和金相沉积法。

2 宏观检验

宏观检验是用肉眼或低倍放大镜检查钢锭、钢材或其它金属材料的缺陷，宏观检验一般有断口检验、酸蚀检验和印痕检验等方法，观察范围远远超过显微观察的范围。

宏观检验的目的是：

1)观察金属结晶情况。

2)检查金属在熔炼、浇注以及凝固过程中产生的气孔、缩孔、疏松、裂纹和夹杂等缺陷。

3)分析合金的偏析状况及夹杂分布。

宏观检查试样，应在指定的检查部位取样，并注意做到不使被检验的截面组织因切取操作而产生任何变化。如用热切割方法切取时，应将金属受热影响部分完全加工除去。

2.1 断口检验

断口检验是用肉眼或放大镜（<20 倍）直接观察材料和零件的断口。

断口检验试样的截取，应一次锤击或压折完成，不能反复冲击。韧性断口往往掩盖了缺陷的真实情况，所以有时将试样经淬火硬化后折断。

断口检验可以发现金属材料某些本身缺陷和生产制造工艺中存在的问题，如缩孔、疏松、气孔、裂纹、夹杂等缺陷。断口特征如表 3.1.8-1 所示。

2.2 酸蚀检验

酸蚀检验能够更加清晰地观察材料的偏析，疏松、枝晶、白点、发纹等缺陷。

进行酸蚀试样的表面粗糙度Ra一般不大于 1.6 μm。检查气孔、缩孔、严重内裂、夹渣等，锯切面就可以；检查较细的疏松、低倍夹杂物、偏析和枝状组织等，要经精车、精刨；检查晶粒度、硫或磷偏析以及灰铸铁的共晶团等，需要磨光和抛光。经淬火或其他具有高应力的

零件，酸蚀之前应充分回火，防止浸蚀开裂。

酸蚀检验一般采用热蚀，对于不宜采用热蚀的材料、大工件、内应力大的试件采用冷蚀法。冷酸蚀检验要求试样检验面表面粗糙度数值小。

表 3.1.8-1 断口分类及特征

断口分类	断口名称	形成原因	特征
一般断口	纤维状断口	断裂前有塑性变形，断口上看得出滑移形变的痕迹，一般经淬火回火后的结构钢多为此种断口	无金属光泽，由暗灰色纤维状断口所组成
	结晶状断口	断裂前不产生显著的塑性变形	断口具有很强烈的金属光泽，断口齐平
	瓷状断口	没有金属延伸，如工具钢淬火状态下，即为此种断口	具有微弱的金属光泽，呈银灰色，似打碎的瓷器断口
缺陷断口	层状断口	因带状偏析所致，在韧性状态下折断	沿纤维方向出现木纹状结构，钢材轴心最为明显，无金属光泽。有时在木纹状结构上有细小亮线
	萘状断口	由于过热产生，高速钢萘状断口一般是由于多次淬火产生的（检查萘状断口应在淬火或淬火-低温回火脆性状态下折断，才能保证结果正确）	在断口上有类似于萘晶的颗粒，有亮点，是一种穿晶的粗晶断口
	白点	由于钢中氢与组织应力的作用	在细晶粒断口的基底上呈银白色的圆形或椭圆形斑点
	非金属夹杂及夹渣	检验夹杂或夹渣时，容易与气泡混淆，一般可将断口在空气炉中加热至300℃左右，冷却后观察，若在条纹上发现氧化色是气泡	在纵向断口上呈条状或块状，一般较基底色泽暗，夹渣在断口上常呈白色或黄色块状物
	内裂		断口上呈现弯曲状或直线状的裂纹一般出现在钢材的中心部位。当断口面与裂纹表面平行或沿裂纹表面断开时，呈局部光滑平面或夹层、若难以判断时，可做酸蚀试验予以验证
	气泡		在纵向断口上沿纤维方向存在的内壁光亮、底部平滑的细长条状缺陷，横向断口呈孔状
	缩孔及疏松		在断口上沿钢材轴心出现，呈非结晶状条带，无光泽的暗黑色。

用于显现钢铁宏观组织酸蚀的主要试剂见表 3.1.8-2。用于显示有色合金宏观组织的主要试剂见表 3.1.8-3。

酸蚀试样在酸蚀前清洗去油污；酸蚀后迅速在流水中清洗，并用毛刷用力刷去表面的附着物，再冲净吹干，即可观察。

表 3.1.8-2 显现钢铁宏观组织用的主要试剂

试剂成分	使用方法	用途
盐酸 1份 水 1份	60～85℃热浸。时间根据不同材料和试验目的而定，一般 10～40 min	显示偏析、疏松、内裂、夹杂、气泡、裂缝、软点、枝晶等
盐酸 38% 硫酸 12% 水 50%	60～85℃热浸。时间根据不同材料和试验目的而定，一般 10～40 min	显示偏析、疏松、内裂、夹杂、气泡、裂缝、软点、枝晶等

续上表

试剂成分	使用方法	用途
硝酸 10% 水 90%	室温下浸蚀	显示偏析、疏松、内裂、缩孔、气泡等缺陷，以及碳钢及低合金钢的低倍组织
2%～5%的硝酸酒精溶液	室温下浸蚀。试样表面须经研磨	适用于研磨裂缝、硬化层、渗碳层及脱碳层的检查
氯化铜 2.5 g 氯化镁 10 g 盐酸 5 ml 酒精 250 ml	先用少许水将氯化盐溶化，再依次加入盐酸和酒精。试样表面浸出铜色，可显示磷偏析。灰铁试样浸1～3 h，可显示共晶团。试样要经抛光	显示磷偏析和灰铁共晶团
苦味酸 1 g 盐酸 5 ml 酒精 100 ml	加热使用	显示Fe-Cr-Ni及Fe-Cr-Mn钢的奥氏体晶界
过硫酸铵 50 g 水 500 ml	室温下擦拭或浸蚀	显示碳钢、低中合金钢的低倍组织、夹杂物及裂纹等
三氧化铬 5 g 盐酸 50 ml 水 50 ml	室温下浸 10 min	显示不锈钢、耐酸钢、耐热钢、热强钢等的低倍组织
氯化高铁 30 g 氯化铜 1 g 氯化锌 9.5 g 盐酸 50 ml 乙醇 500 ml 水 500 ml	室温下浸 0.5～20 min	显示铸钢枝晶

表 3.1.8-3　　显示有色合金宏观组织的主要试剂

试剂成分	使用方法	用途
10%氢氧化钠水溶液	试样浸入70℃的溶液中直到形成黑色膜（约30～40 S），再浸入25%的硝酸水溶液里中和，然后洗净、吹干	用于Al-Cu合金
氢氟酸 20% 盐酸 15% 硝酸 15% 水 50%	将试样浸入室温下的试剂里，待宏观组织显露后，移入25%硝酸水溶液里中和，再洗净、吹干	用于较复杂的Al-Cu合金
盐酸 50 ml 硝酸铁 25 g 水 25 ml	试剂配好后保存一昼夜，用棉花蘸试剂湿润试样磨面，直至生成黑色膜，再移入25%硝酸水溶液里，以去除形成的黑色膜，然后水洗、干燥	用于Al-Si合金
氢氟酸 10 ml 盐酸 15 ml 水 90 ml	试样磨面用试剂湿润 60 s，然后水洗、吹干	用于Al-Mg合金
重铬酸钾 15 g 硫酸 100 ml 水 100 ml	60℃热浸 5～10 min，水洗、吹干	显现铜合金宏观组织

续上表

试剂成分		使用方法	用途
10%～20%过硫酸铵水溶液		80～90℃热浸 5～10 min，水洗、吹干	显现铜合金的枝晶
不同浓度的硝酸水溶液			显现各种铜合金的宏观组织
冰醋酸 硝酸钠 水	20% 5% 75%	室温下浸 1～5 min，水洗、干燥	用于镁合金的宏观组织
浓硝酸 水	15% 85%	室温下浸 10～30 s，水洗、吹干	用于Mg-Al-Zn和Mg-Mn合金

2.3 印痕检验

印痕检验主要是指硫印法和磷印法，检查钢铁中硫、磷的偏析。进行硫印或磷印检验要求试样检验面用砂纸磨光并洗净。

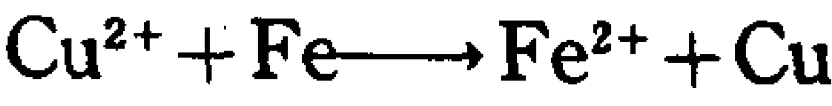
1)硫印法

把预先经 2%硫酸水溶液浸湿的印相纸乳剂面对着试样表面贴紧，用橡皮滚子赶出气泡，1～2 min后把相纸取下用水清洗并在海波水溶液里定影，再彻底清洗并烘干。

在相纸上形成的硫化银深色斑点，即反映试样的多硫偏析区。

2)磷印法

将抛光的试样在由 85 g氧化铜、53 g氯化铵和 100 ml水组成的溶液中浸泡 30～60 s，溶液同试样表面发生反应：



$Cu^{2+} + Fe \longrightarrow Fe^{2+} + Cu$

这样，溶液中的铜被还原而沉淀在试样表面上。从溶液中取出试样，干燥后进行观察，没有被铜膜覆盖的区域就是富磷区。

3 常用金属材料制样和组织特点

3.1 钢

试样经砂轮粗磨以后，再依次用 180、240、400 和 600 号水砂纸磨光。对于淬火钢，试样在截取和磨光时必须充分冷却，以防回火。试样细磨后冲洗，然后抛光。首先在无毛织物(帆布或尼龙)上用 5～7μm的氧化铝水浆粗抛，然后用 1～2μm的氧化铝水浆在平绒上或用三氧化二铬水悬浊液在丝绒上抛光，最后用 0.25～0.05μm的氧化铝在平绒上精抛。显示碳钢及合金钢组织常用腐蚀剂见表 3.1.8-4。其中 1%～5%硝酸酒精溶液是腐蚀碳钢及合金钢最常用的腐蚀剂。不锈钢具有很高的耐腐蚀稳定性，所用腐蚀剂必须是强烈的试剂，多采用以盐酸为主的腐蚀剂。

钢的典型组织有珠光体、马氏体、贝氏体、奥氏体如渗碳、氮化组织等，分别见图3.1.8-1至图 3.1.8-7。



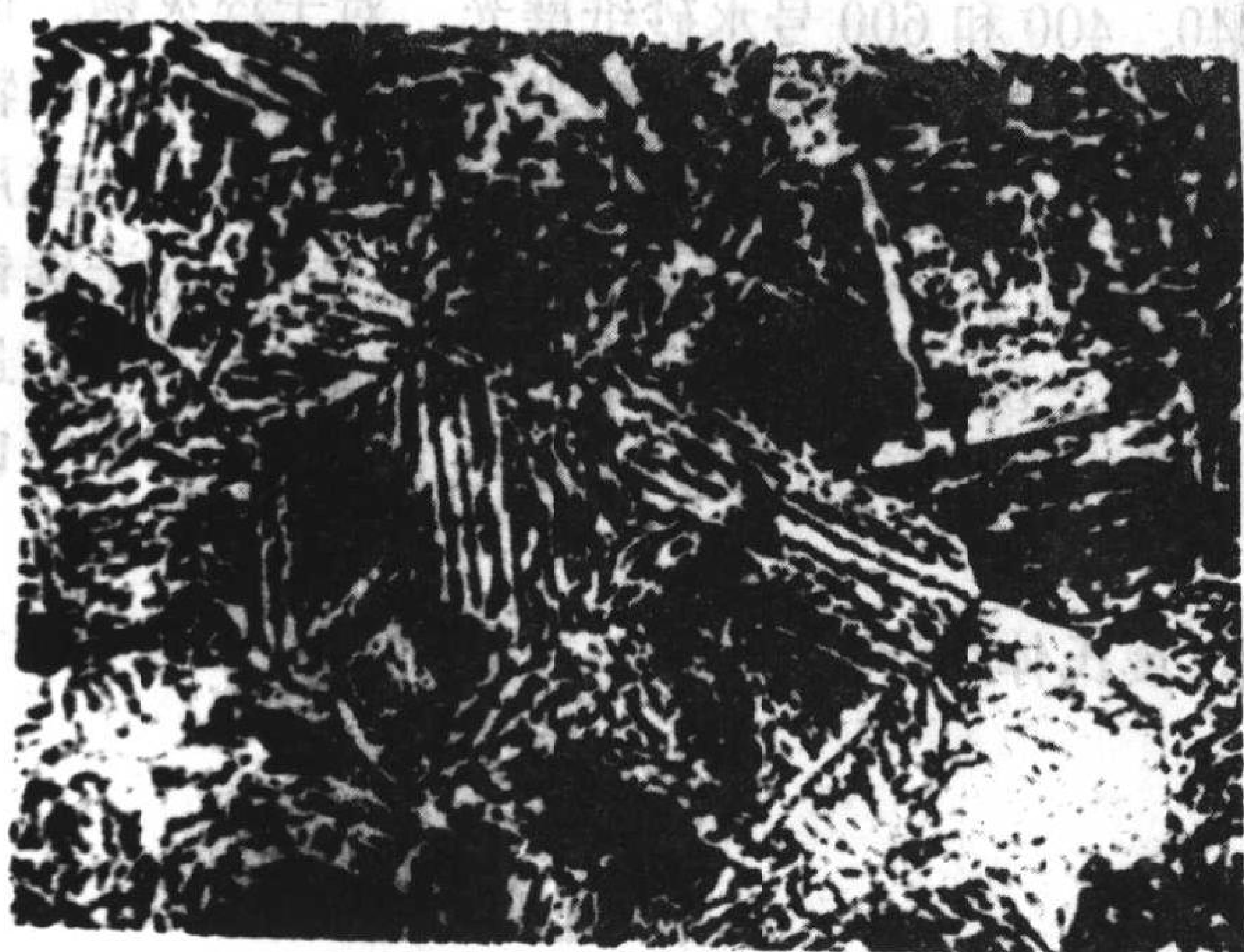
材料：45 钢
工艺：1000℃加热，保温 30 min后炉冷
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：珠光体＋铁素体
放大倍数：500×

图 3.1.8-1　碳钢退火组织



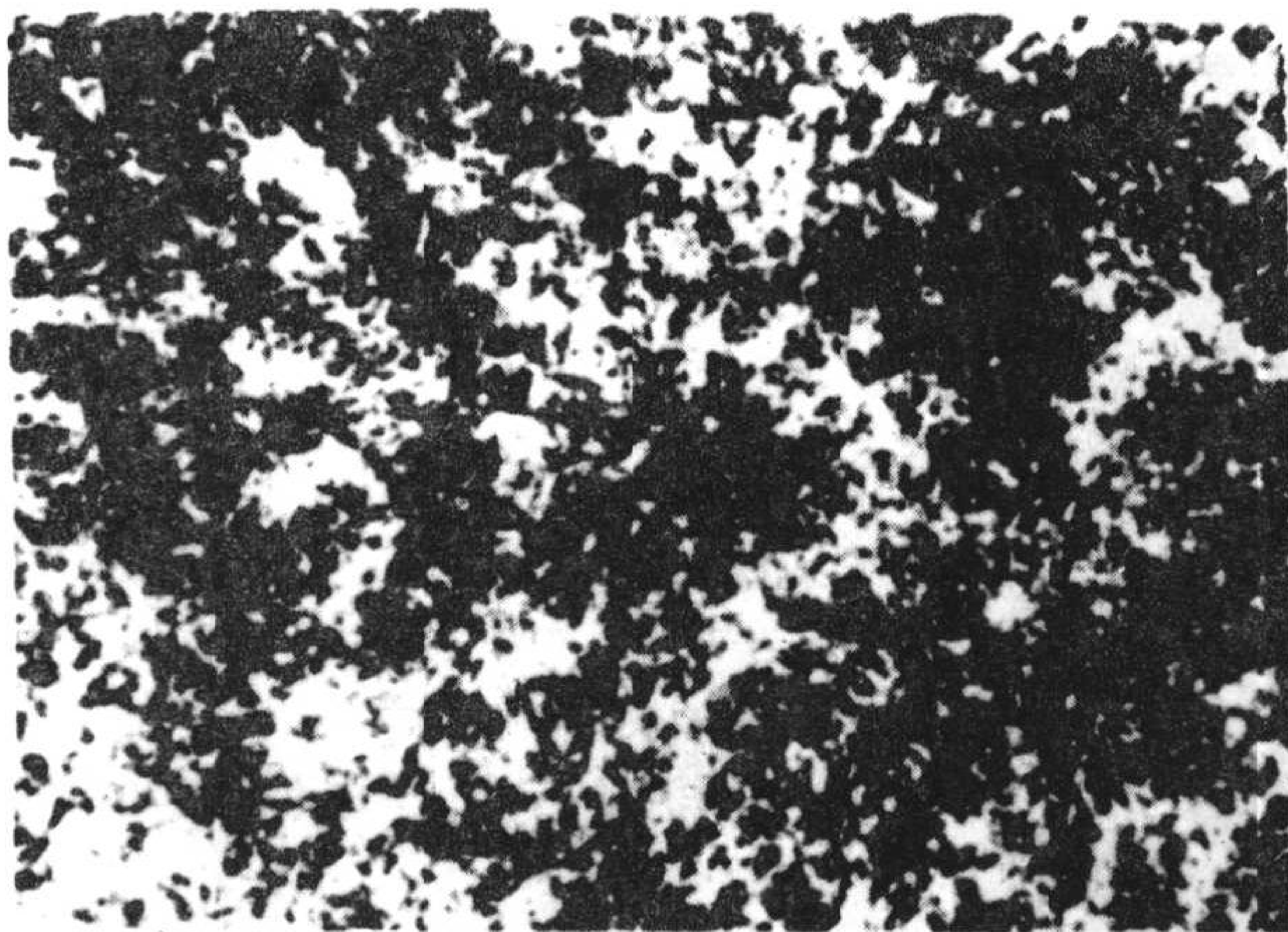
材料：30 CrMnMoTiA
工艺：890℃加热min，375℃等温 30 s
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：上贝氏体＋马氏体
放大倍数：800×

图 3.1.8-2　等温淬火组织



材料：35 CrMo
工艺：调质
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：回火索氏体
放大倍数：500×

图 3.1.8-3　结构钢调质组织



材料：GCr 15
工艺：800℃油淬，150℃回火
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：隐晶马氏体＋残留碳化物（颗粒状）
放大倍数：500×

图 3.1.8-4　淬火组织



材料：18 Cr 2 Ni 4 WA
工艺：910℃ 5 h渗碳后空冷，850℃油淬，170℃ 3 h回火空冷
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：回火马氏体（黑色基体）＋残余奥氏体（白色部分）＋碳化物（小白色颗粒）
放大倍数：500×

图 3.1.8-5　渗碳淬火组织



图 3.1.8-6　氮化组织

材料：38 CrMoAl　工艺：调质后离子氮化　浸蚀：4%硝酸酒精　组织：ε相（表面白色层）＋脉状组织
放大倍数：500×

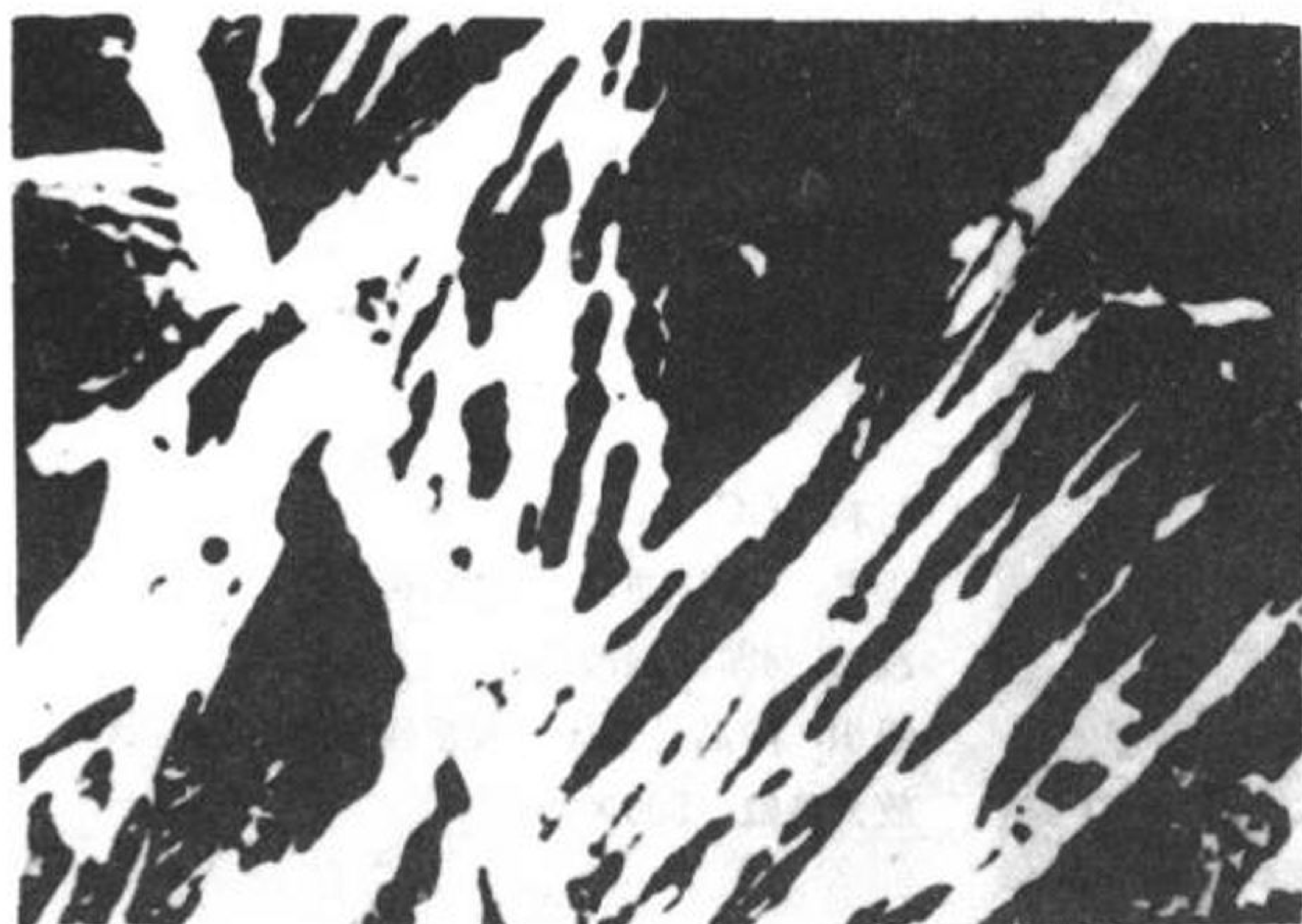


图 3.1.8-7　过热组织

材料：09 Mn 2
工艺：过热
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：魏氏组织（白色网状及晶内针状铁素体＋珠光体）
放大倍数：700×

表 3.1.8-4　　显示碳钢及合金钢显微组织常用腐蚀剂

成　　分		使 用 要 点	适 用 范 围
HNO_3 酒精	1～5 ml 100 ml		显示低碳钢中的铁素体晶界，产生珠光体和渗碳体或铁素体网的最大反差，显示4%硅钢晶界、马氏体或铁素体构成的组织中的铁素体晶界
苦味酸 酒精（或木醇）(95%)	4 g 100 ml		显示珠光体、未回火或回火马氏体、贝氏体细节，显示马氏体中未溶碳化物颗粒 利用侵蚀后色彩差别来识别铁素体，马氏体和大块碳化物；识别贝氏体和细珠光体，显示低碳钢晶界上的碳化物颗粒
1～2%硝酸酒精溶液 4%苦味酸酒精溶液	50 ml 50 ml	先在硝酸酒精轻腐蚀，然后在苦味酸酒精腐蚀	合金钢，显示碳化物
HCl 苦味酸 酒精（或木醇）(95%)	5 ml 1 g 100 ml		显示回火或未回火马氏体的原奥氏体晶粒，显示珠光体群
HCl（浓） 苦味酸 酒精（95%）	1～1.5 ml 2～3 g 100 ml	室温下浸 5～11 s	显示珠光体群
酒石酸 水	10 g 100 ml	浸 5 min，热水漂洗	检査夹杂物
$K_2Cr_2O_7$ 蒸馏水 冰醋酸	30 g 225 ml 30 ml	室温浸蚀 10～20 s，热水漂洗并干燥	显示铅夹杂物（偏光下检查为金黄色或黄色）
CrO_3 蒸馏水 NaOH	16 g 145 ml 80 g	慢慢加入NaOH，不断搅拌。 煮沸 10～30 min，热水漂洗并干燥	含镍中碳合金钢的晶界氧化

续上表

成　　分	使 用 要 点	适 用 范 围
25 ml饱和苦味酸酒精溶液中加几滴盐酸		一般组织，分辨碳化物组织，特别是热处理组织
偏亚硫酸钾 10 g 水 100 ml	先用硝酸酒精或苦味酸酒精溶液浸蚀	分辨淬火组织
偏亚硫酸钠 8 g 水 100 ml		显示淬火马氏体组织，反差良好
$FeCl_3$ 5 g HCl 50 ml H_2O 100 ml		显示奥氏体镍钢及不锈钢显微组织
HNO_3 5～10 ml 酒精 95～90 ml		显示高速钢组织
HCl 25 ml 10%CrO_3水溶液 5～50 ml		热处理后的18-8不锈钢，8%镍不锈钢
HNO_3 10 ml HCl 20～30 ml 甘油 30～20 ml	浸蚀前试样先用温水微热之	高速钢、高锰钢
HNO_3 10 ml HCl 20 ml 甘油 20 ml H_2O_2 10 ml		显示Fe-Cr-Mn，Fe-Cu-Ni，Fe-Cr各类奥氏体合金钢组织
$CuCl_2$ 5 g HCl 100 ml 酒精 100 ml H_2O 100 ml		适用于铁素体及奥氏体钢 铁素体容易浸蚀，碳化物不被浸蚀
HNO_3 5 ml HF（48%） 1 ml H_2O 44 ml	浸 5 min	显示奥氏体不锈钢，但不显示应力线
$CuCl_2$ 1 g $MgCl_2$ 4 g HCl 20 ml 酒精 100 ml	浸 1 min，低磷部分铜先沉积，浸蚀后轻抛光以去除铜层	显示固溶体中磷的偏析
$FeCl_3$ 30 g $CuCl_2$ 1 g $SnCl_2$ 0.5 g HCl 50 ml 酒精 500 ml H_2O 500 ml		显示磷的偏析及树枝状组织

3.2　铸铁

灰口铁、球墨铸铁和可锻铸铁试样，经砂轮磨平后，用240、320和500号水砂纸湿磨，然后用03、05金相砂纸手工磨光。对于粗片石墨的灰口铁、球墨铸铁和可锻铸铁，最后干磨有利于保存石墨。在最后一道砂纸磨光之前，珠光体基体的试样在苦味酸酒精中适当地深腐蚀，铁素体基体的试样在硝酸酒精溶液中轻腐蚀，这样有助于表面变形层的去除。

防止石墨污染或脱落，要选择适当的抛光织物，采用短毛、纤维柔软的丝绒较为适宜。抛光磨料可用浮选的三氧化二铬。

显示铸铁显微组织常用腐蚀剂见表 3.1.8-5。4%苦味酸酒精或 1%～5%硝酸酒精溶液对大多数铸铁都可以得到满意的腐蚀效果。苦味酸酒精溶液特别适用于珠光体基体铸铁，苦味酸不会损伤石墨，而且使石墨片或石墨球的轮廓显得清楚。如果观察含有铁素体的铸铁组织，采用硝酸酒精溶液。

灰口铁、球墨铸铁等组织见图 3.1.8-8～图 3.1.8-11。

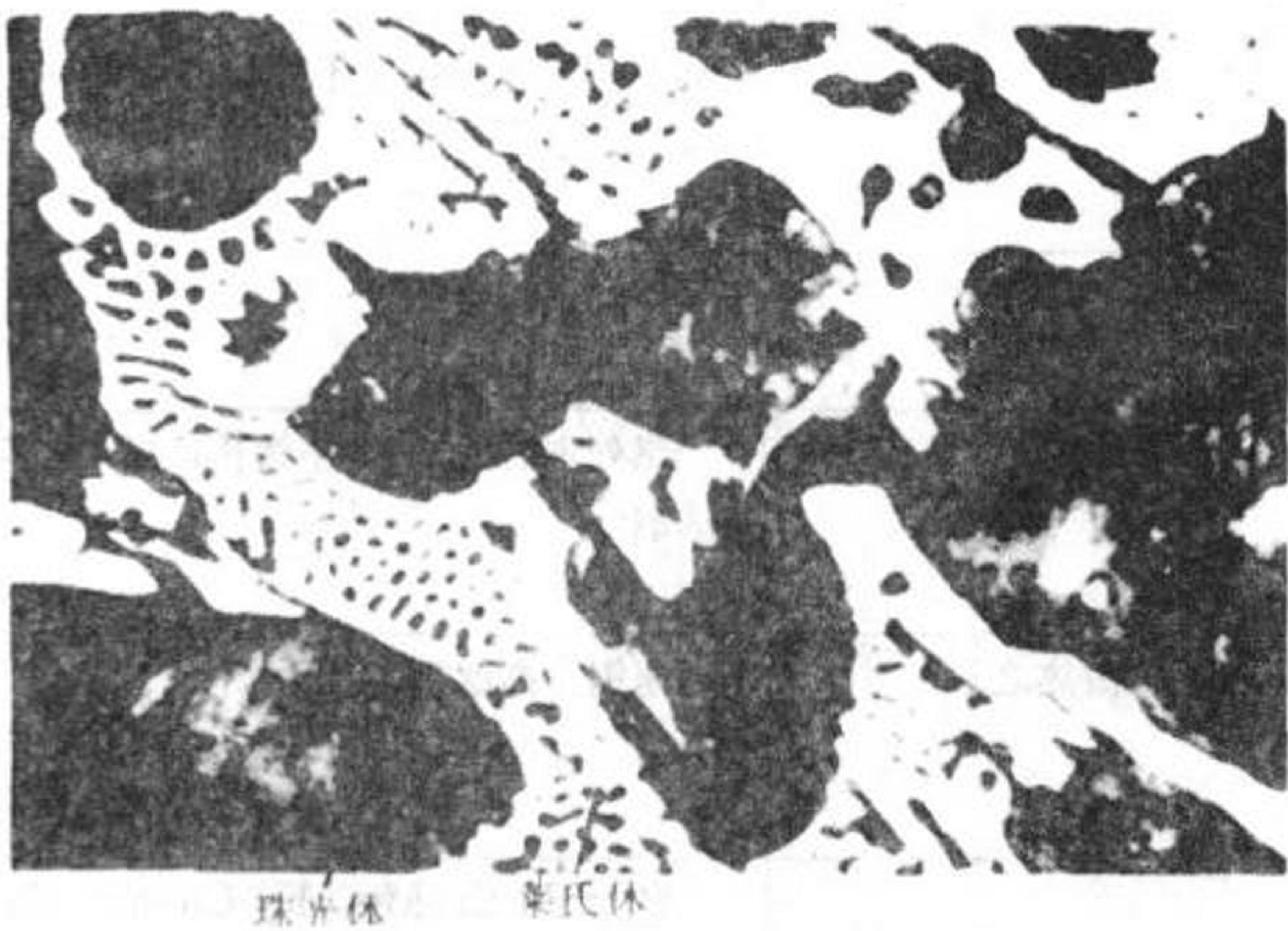


图 3.1.8-8　共晶白口铁组织

材料：共晶白口铁
工艺：铸态
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：莱氏体＋珠光体
放大倍数：200×

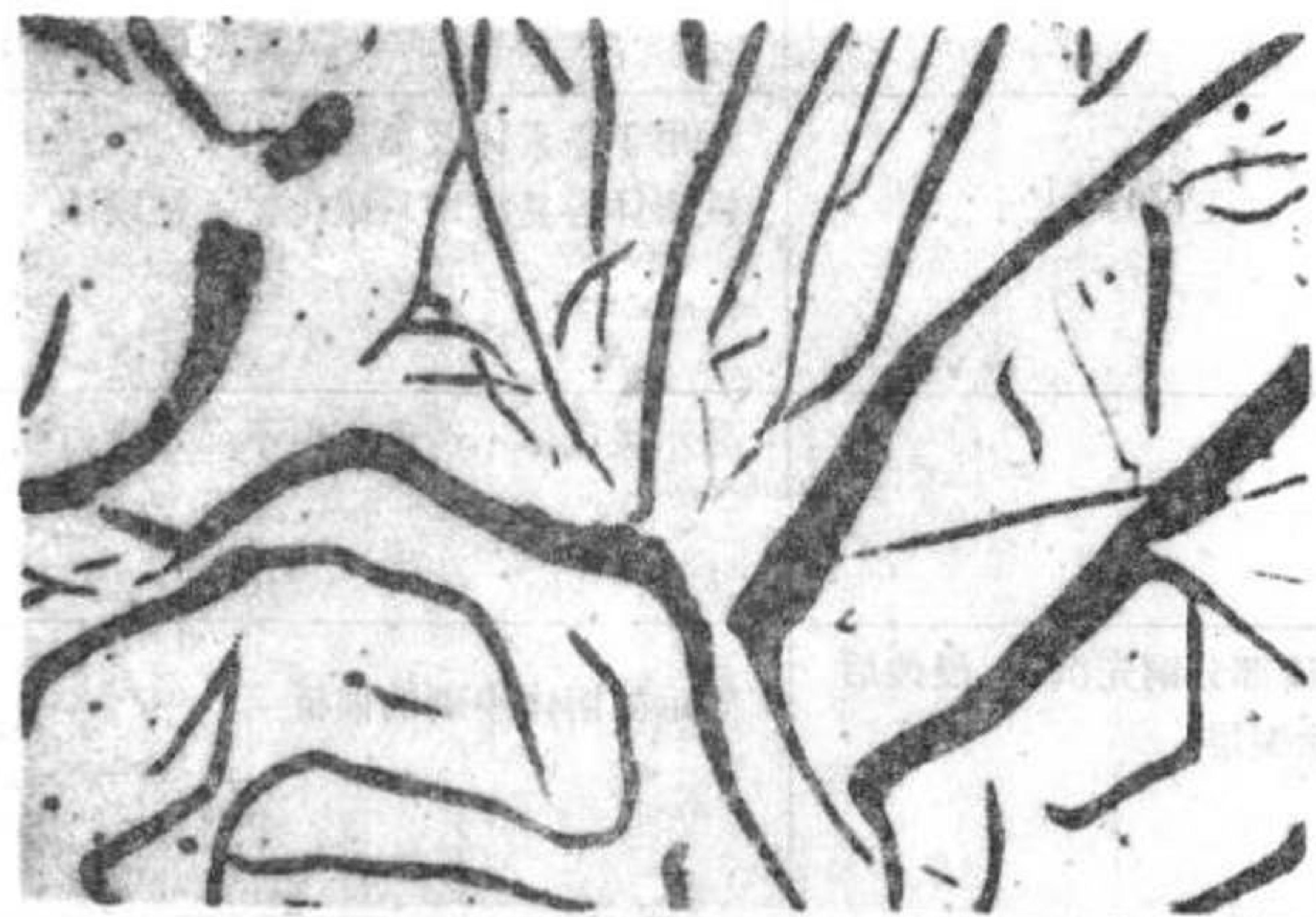


图 3.1.8-9　灰口铁石墨组织

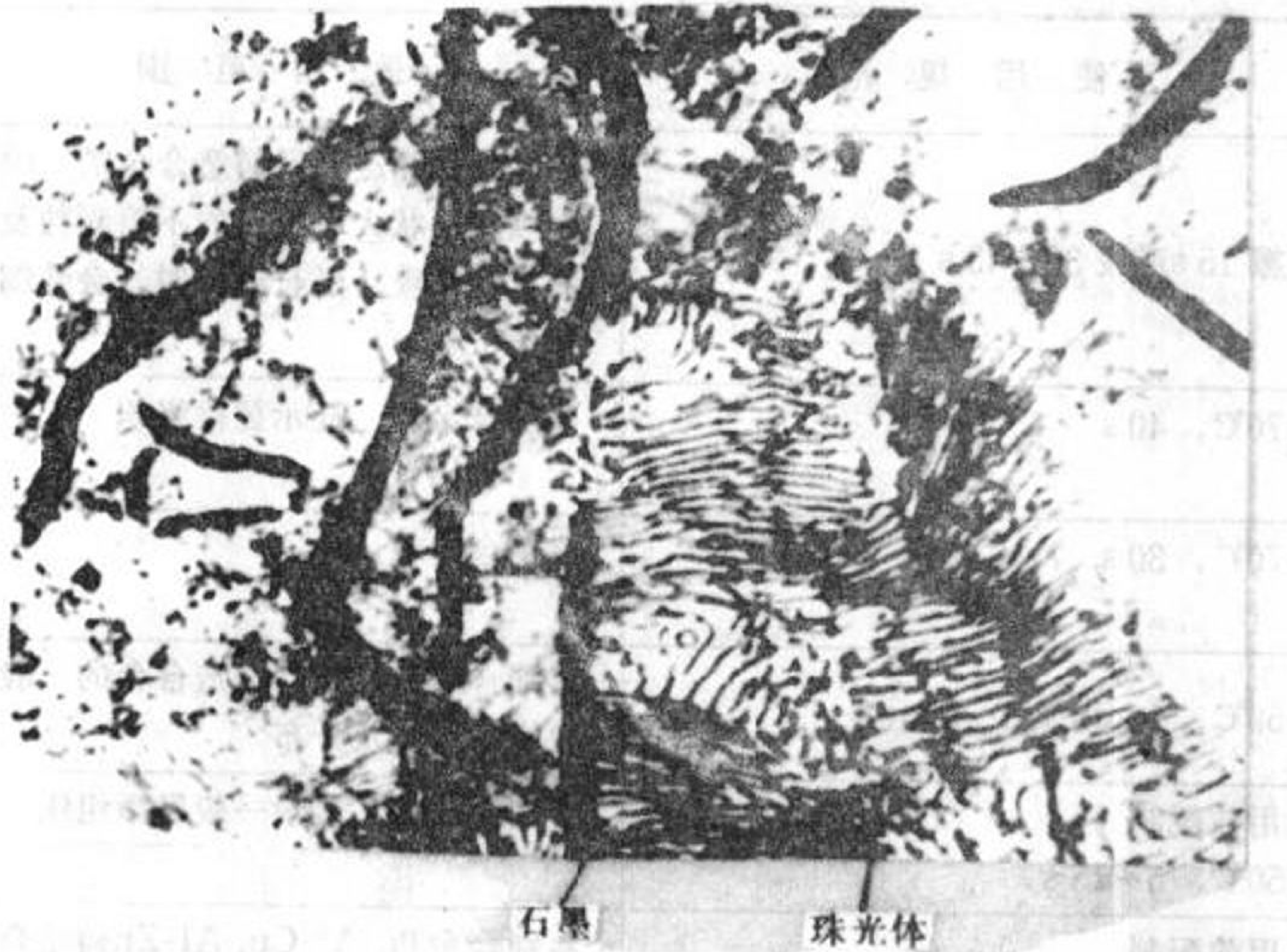
材料：灰口铁HT 200
工艺：550～600℃时效
浸蚀：未浸蚀
组织：片状石墨
放大倍数：500×

表 3.1.8-5　**显示铸铁显微组织常用腐蚀剂**

成　　分	腐 蚀 方 法	适 用 范 围
苦味酸 4 g 酒精 96 ml	浸 2～10 s	珠光体灰口铁，可锻铸铁及球墨铸铁，奥氏体铸铁，镍硬及贝氏体铸铁
HNO_3 5 ml 酒精 95 ml	浸 2～10 s	铁素体灰口铁，可锻铸铁及球墨铸铁，某些奥氏体铸铁及含马氏体的铸铁
HNO_3 2 ml 酒精 98 ml	浸 2～10 s	高倍下观察铁素体晶界

续上表

成　　分		腐 蚀 方 法	适 用 范 围
$FeCl_3$ H_2O	10 g 100 ml	浸 3～12 s	奥氏体铸铁
HNO_3 HF 甘油	10 ml 20 ml 40 ml	浸 10～40 s	高硅（14%～16%Si）铸铁
HNO_3 HCl 甘油	1 份 2 份 3 份	浸 20 s	高铬铸铁
10%铁氰化钾碱性水溶液		50℃浸 5～30 s	高铬铸铁
KOH $K_3Fe(CN)_6$ H_2O	10 g 10 g 100 ml	(1)浸 2～3 min (2)70℃，1.5 min	30%铬铸铁 高磷铸铁，区别磷化铁与碳化铁
苦味酸 NaOH H_2O 加热到溶解	2 g 25 g 100 ml	煮沸 10 s～2 min	渗碳体变黑
HNO_3 乙醇	15 ml 85 ml		高铝铸铁



材料：灰口铸铁
工艺：铸态
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：石墨＋珠光体
放大倍数：400×

图 3.1.8-10　灰铸铁组织

3.3 铝和铝合金

试样用中粗板锉锉平以后，用 280、320、M 28、M 14、M 7 金相砂纸磨光，砂纸上要涂以煤油或石蜡油以防磨料颗粒嵌入基体及擦伤磨面。每一步研磨之后要仔细清洗试样。粗抛光先用帆布和 5～7 μm的氧化铝水浆，然后用平绒和 1～2 μm氧化铝水浆抛光，最后在麂皮上涂以氧化镁浆进行精抛光。

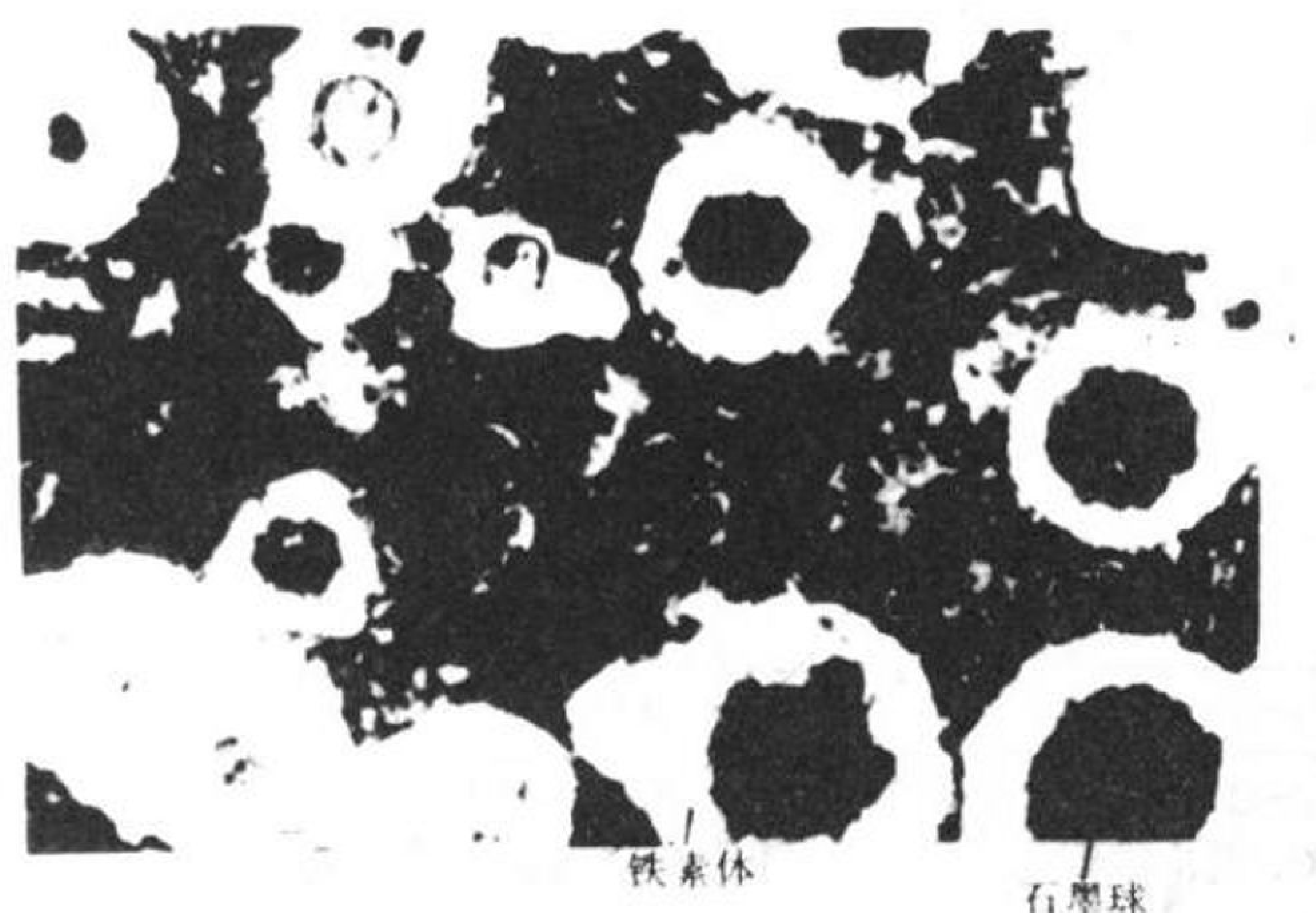


图 3.1.8-11　球墨铸铁组织

材料：稀土镁球墨铸铁QT 45-5
工艺：铸态
浸蚀：4%硝酸酒精
组织：珠光体（基体）＋铁素体＋石墨球（黑色）

在制备试样过程中要防止试样温度过高（≥180℃）发生组织变化（回复和沉淀过程）并防止研磨过重引起变形。

显示铝合金显微组织常用腐蚀剂见表 3.1.8-6。

船用铸铝合金典型组织见图 3.1.8-12 和 3.1.8-13。

表 3.1.8-6　显示铝合金显微组织常用腐蚀剂

成　　分		使 用 规 范	适 用 范 围
HF（48%） H_2O	0.5 ml 100 ml	擦 15 s或浸 30～45 s	鉴别合金相，显示铸造合金的一般组成物的形状大小，粗的不溶颗粒及细的沉淀颗粒。延长腐蚀时间会使细小颗粒扩大
HNO_3（1.40） H_2O	25 ml 75 ml	70℃，40 s	鉴别合金相，显示显微组织
H_2SO_4（1.84） H_2O	20 ml 80 ml	70℃，30 s，冷水冲洗	鉴别合金相
H_3PO_4 H_2O	10 ml 90 ml	50℃，1 min或 3～5 min	鉴别合金相，所有铸造合金的一般组成物的大小及分布
NaOH H_2O	1 g 100 ml	用前配制 50℃，5～15 s	鉴别合金相，显示一般显微组织
NaOH H_2O	10 g 90 ml	用前配制 70℃，5 s	鉴别合金相，Al-Cu，Al-Zn铸造合金晶粒对比或显示晶界线
$Fe(NO_3)_3$ H_2O	10 g 100 ml	室温 30 s	鉴别合金相
HF（48%） HCl（1.19） HNO_3（1.40） H_2O	2 ml 3 ml 5 ml 190 ml	浸 8～15 s，热水漂洗吹干，不去除表面腐蚀产物	Al-Cu，Al-Zn铸造合金晶粒对比或显示晶界线
4#试剂 H_2O	20 ml 80 ml	用前混合 浸 5～10 s	鉴别合金相

续上表

成分		使用规范	适用范围
HF (48%) HNO_3 (1.40) 甘油	20 ml 10 ml 30 ml		显示显微组织、一般用途
HF (48%) HCl (1.19) H_2O	10 ml 15 ml 90 ml	浸 10～20 s，温水冲洗再浸入浓 HNO_3中	显示显微组织
HF (48%) HCl (1.19) HNO_3 (1.40) H_2O	15 ml 45 ml 15 ml 25 ml		显示显微组织
NaF HCl (1.19) HNO_3 (1.40) H_2O	0.5 g 2 ml 1 ml 97 ml	浸 30 min	淬火及硬化的Al-Cu合金中的滑移线，Al-Cu-Mg合金中的应变线，显示显微组织

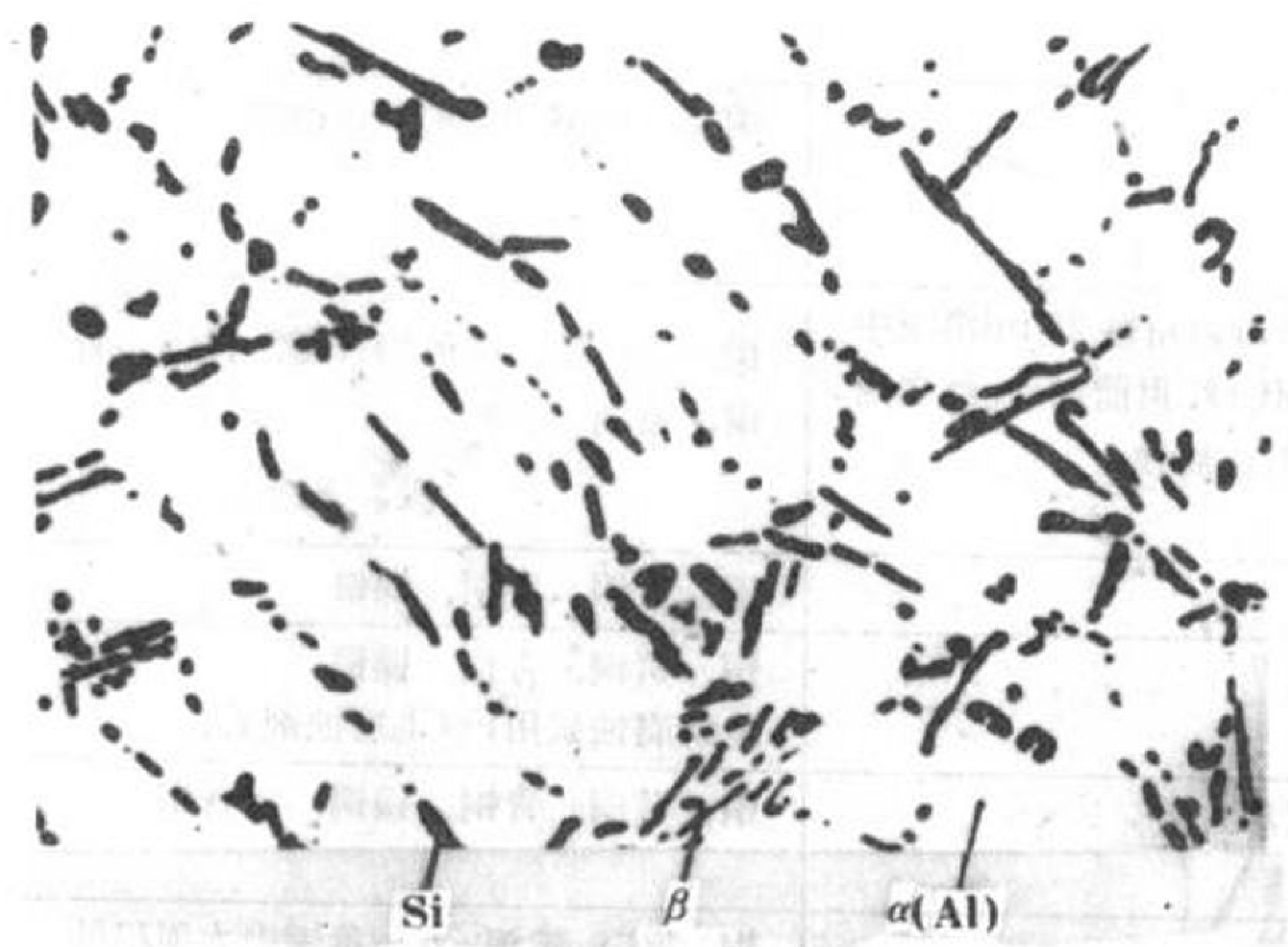


图 3.1.8-12 铸铝淬火组织

材料：铸铝ZL-101
工艺：砂型铸造T 4 处理
浸蚀：0.5%氢氟酸
组织：灰色片状相是Si，
浅灰色片状相是β (Al 9 Fe 2 Si 2)，基体为α (Al)
放大倍数：160×

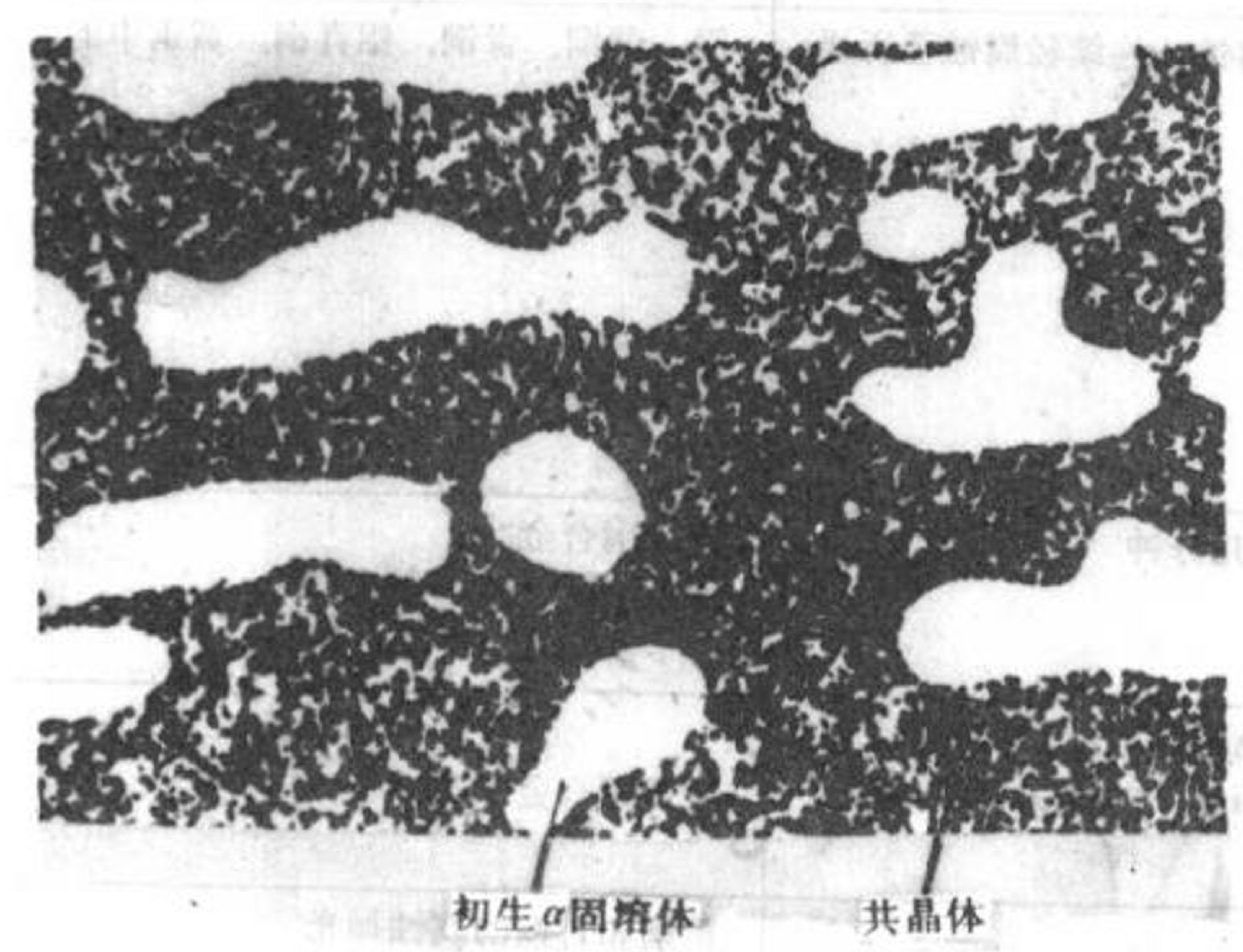


图 3.1.8-13 变质铸铝组织

材料：铸铝ZL-102
工艺：砂型铸造，变质，未处理
浸蚀：0.5%氢氟酸
组织：共晶体中的Si呈细小的点状和针状，
初生α固溶体（卵石状白块）
放大倍数：200×

3.4 铜和铜合金

铜合金试样用细板锉锉平，然后用水砂纸湿磨或在金相砂纸上加煤油逐级磨光，每一步均需仔细清洗。用帆布或尼龙作抛光织物，加 5～7 μm的氧化铝抛光，腐蚀和抛光交替进行，最后用平绒加氧化镁精抛。

显示铜及铜合金显微组织常用腐蚀剂见表 3.1.8-7。其中氢氧化铵-双氧水溶液适用于大多数铜合金，它对道痕不敏感。

船用硅黄铜、青铜典型组织见图 3.1.8-14 和图 3.1.8-15。

表 3.1.8-7　显示铜及铜合金显微组织常用腐蚀剂

成分		腐蚀方法	应用范围
HN_4OH H_2O H_2O_2（3%）	20 ml 0～20 ml 8～20 ml	浸或擦 1 min双氧水含量随合金铜含量而变，用新H_2O_2结果最好，腐蚀铝青铜时表面形成的膜可以用弱的$FeCl_3+HCl+$水除去	铜及铜合金
$Fe(NO_3)_3$ H_2O	1 g 100 ml	浸	铜及铜合金腐蚀抛光
NH_4OH H_2O $(NH_4)_2S_2O_8$（2.5%）	25 ml 25 ml 50 ml	浸	铜及一些铜合金的腐蚀抛光
$K_2Cr_2O_7$ H_2SO_4 NaCl饱和溶液 H_2O	2 g 8 ml 4 ml 100 ml	浸，NaCl溶液可以用每 25 ml溶液中加入 1 滴HCl代替，用前加入，继之用$FeCl_3$或其它对比腐蚀	铜、铍、锰、硅的铜合金，镍银，青铜，铬铜
CrO_3饱和水溶液		浸或擦	铜、黄铜、青铜、镍银
CrO_3（10%～15%） HCl	50 ml 1～2 滴	用前加入HCl 浸	铜、黄铜、青铜、镍铜 电解腐蚀试用$FeCl_3$腐蚀剂着色
$(NH_4)_2S_2O_3$ H_2O	10 g 90 ml	浸（冷蚀或煮沸）	铜、黄铜、青铜、镍铜、铝青铜
10%氯化铜铵水溶液加氢氧化氨至中性或碱性		浸，彻底清洗试样	铜、黄铜、镍银、α-β黄铜中大面积的β变黑
$FeCl_3$(g) HCl(ml) H_2O(ml) 5　50　100 20　5　100① 25　25　100 1　20　100 8　25　100 5　10　100②		浸或擦，轻腐蚀或连续轻腐蚀至所要求的结果	铜、黄铜、青铜、铝青铜。黄铜中的β变黑
$FeCl_3$ 乙醇 HCl	5 g 100 ml 5～30 ml	浸或擦 1 s至几分钟	铜及铜合金
硝酸（各种浓度）		浸或擦，把$AgNO_3$(0.15～0.3%)加至 1∶1 溶液中，得到漂亮的结果，深腐蚀	铜及铜合金
氢氧化氨稀溶液		浸	黄铜和青铜的腐蚀抛光

续上表

成　　分	腐 蚀 方 法	应 用 范 围
HNO_3　50 ml CrO_3　20 g H_2O　30 ml	浸	铝青铜、易切削黄铜
HNO_3　5 ml CrO_3　20 g H_2O　70 ml	浸	铝青铜，易切削黄铜
Fe $(NO_3)_3$　5 g HCl　25 ml H_2O　20 ml	浸	铜及铜合金

注：① 加 1 gCrO_3。
② 加 1 g$CuCl_3$和 0.05 g$SnCl_2$。



图 3.1.8-14 硅黄铜组织

材料：硅黄铜ZHSi 80-3
浸蚀：三氯化铁盐酸水溶液
组织：$\alpha+\beta$
放大倍数：250×

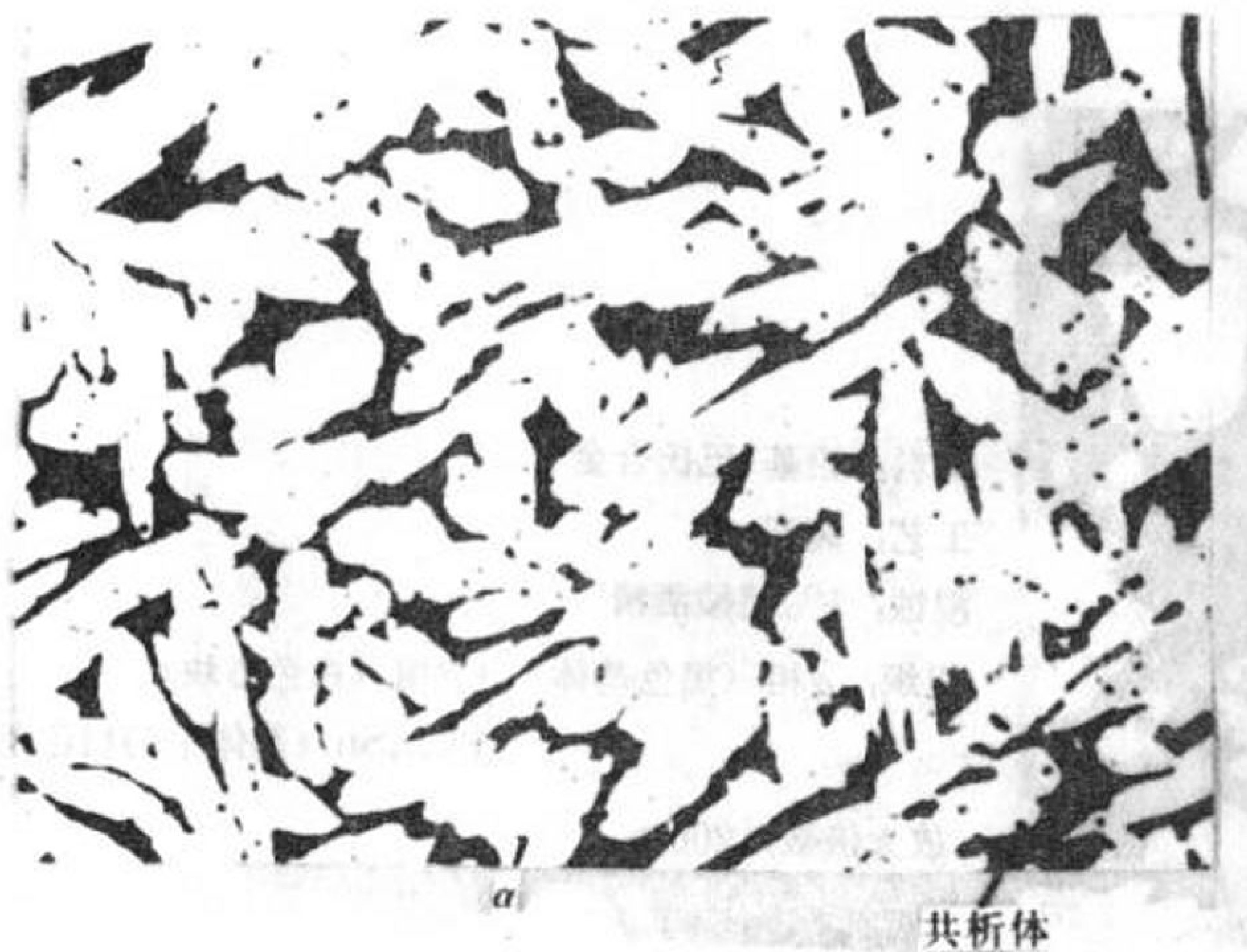


图 3.1.8-15 铁铝青铜组织

材料：铁铝青铜ZQAl 9-4
工艺：铸态
浸蚀：$CuCl_2+NH_4OH$
组织：α固溶体（白色）+共析体（$\alpha+\gamma+Fe$）
放大倍数：200×

3.5 铅和铅合金

铅及铅合金很软，在磨光和抛光过程中会发生相当大的表面流动和变形，造成假象。此外，由于其熔点低，制样中的变形能引起发热和再结晶。因此在制样过程中应加以注意。

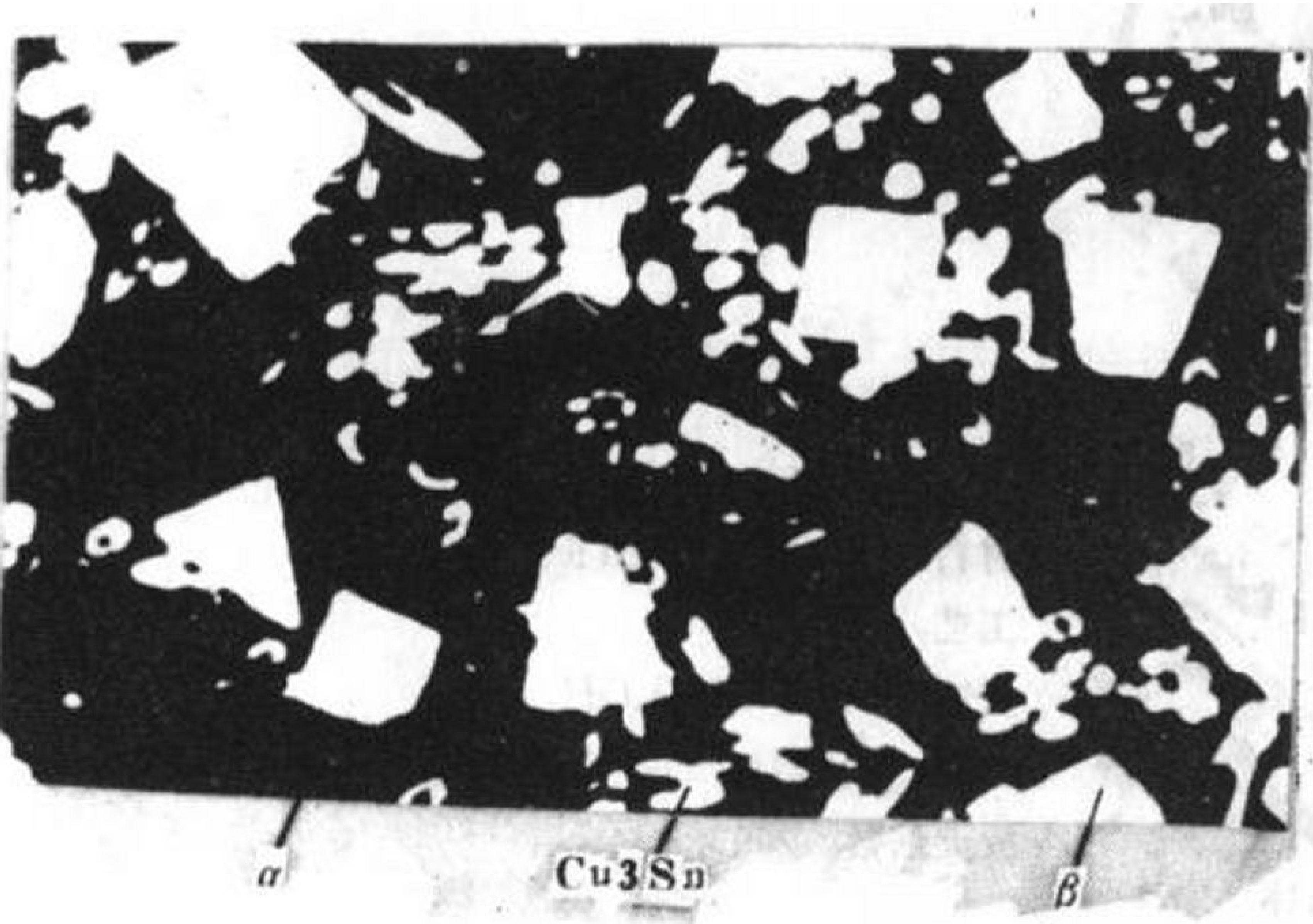
试样用细锉锉平，然后在涂有煤油或石蜡油的砂纸上磨光。抛光前用冰醋酸-双氧水或钼酸铵-硝酸进行深腐蚀，以去除表面扰乱金属层。用帆布加 5～7 μm氧化铝粗抛光后，用平绒加 0.5 μm氧化铝精抛，加肥皂水润滑，腐蚀抛光交替进行，直至表面平滑无痕为止。

常用铅和铅合金腐蚀剂见表 3.1.8-8。

船用铅基合金典型组织见图 3.1.8-16。

表 3.1.8-8 铅及铅合金常用腐蚀剂

成分		用途	应用范围
冰醋酸 硝酸 甘油	1份 1份 4份	用新配制的溶液，用后弃之。80℃宏观浸蚀几分钟，显微浸蚀几秒钟，浸蚀-抛光交替，结果最好	铅的宏观浸蚀 显示铅及Pb-Ca，Pb-Sb，Pb-Sn(低Sn）合金的显微组织及晶界
冰醋酸 双氧水（3%）	100份 10份	腐蚀 10～30 s，取决于扰乱层深度，如果需要，用浓硝酸清洗并干燥	约 2%Sb的Pb-Sb合金的显微腐蚀
冰醋酸 双氧水（30%）	3份 1份	浸 6～15 s，用乙醇清洗并干燥	Pb、Pb-Ca及高于 2%Sb的Pb-Sb合金的显微腐蚀，也用于去除扰乱金属层
溶液*A*：钼酸铵 蒸馏水 溶液*B*：HNO_3（浓） 蒸馏水	15 g 100 ml 6份 4份	等量的溶液*A*和溶液*B*混合交替揩擦和流水冲洗	Pb的宏观浸蚀。是一种快速腐蚀剂，适用于去除厚的扰乱金属层
冰醋酸 硝酸（浓） 双氧水 蒸馏水	2份 2份 2份 5份	擦蚀 2～10 s，流水冲洗并用酒精干燥	Pb，Pb-Bi，Pb-Te及Pb-Ni合金的宏观腐蚀
冰醋酸 硝酸 蒸馏水	3份 4份 16份	用新配的溶液，40～42℃浸 4～30 min，直至去除扰乱层，流水中用棉花擦洗试样	Pb及Pb-3%Sn合金的显微腐蚀
溶液*A*：10%过硫酸铵水溶液 溶液*B*：30%酒石酸水溶液		5 ml溶液*A*与 2 ml溶液*B*混合，擦 5～10 s流水冲洗	像轴承合金或Pb-Sb-Sn这样的典型合金，识别立方SbSn相与富Sb相，溶液*A*使SbSn变黑，溶液*B*腐蚀富Sb相



材料：铅基-巴氏合金

工艺：铸态

浸蚀：1%硝酸酒精

组织：α相（黑色基体）+β相（白色方块）+Cu_3Sn（基体中的白色条状物）

放大倍数：200×

图 3.1.8-16 巴氏合金组织

第2篇　非金属材料

第1章　塑　　料

1　塑料的组成和分类

凡是有机高分子聚合物在一定的加热、加压条件下可塑制成型，而在室温、大气压条件下能保持固定形状的材料称为塑料。塑料的主要成分是合成树脂，它对塑料的性能起决定性的作用。此外，为了改进某些性能的需要，还可以加入其它成分，例如，填料、固化剂、增塑剂、润滑剂、稳定剂、发泡剂和着色剂等。

塑料有热塑性和热固性两大类。热塑性塑料，受热后软化、熔融，冷却后再复原，可以反复多次而化学结构基本不变；热固性塑料，在常温或受热后起化学变化，再加热时不可逆。

2　塑料的特点和用途

2.1　热塑性塑料的特点和用途

表3.2.1-1为热塑性塑料的特点和用途。

表3.2.1-1　**热塑性塑料的特点和用途**

名称（代号、结构式）	主要特点	用途举例
聚乙烯（P E） $\left[CH_2-CH_2\right]_n$	优良的耐腐蚀性和电绝缘性	耐腐蚀件、绝缘件、船机零件
聚丙烯（p p） $\left[CH_2-CH(CH_3)\right]_n$	密度小、强度、刚性、硬度、耐热性、耐腐蚀性、绝缘性均好。但低温变脆、不耐磨、易老化	一般机械零件、耐腐蚀件、绝缘件
聚氯乙烯（PVC） $\left[CH_2-CH(Cl)\right]_n$	优良的耐腐蚀性和电绝缘性；可用氯化聚乙烯等改性；耐冲击、耐寒	耐腐蚀件、绝缘层、密封件等
聚苯乙烯（PS） $\left[CH_2-CH(C_6H_5)\right]_n$	优良的电绝缘性，无色透明，透光率好，质脆、不耐苯、汽油等有机溶剂。可用丁苯橡胶等改性	绝缘件、透明件

续上表

名称（代号、结构式）	主要特点	用途举例
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚体（ABS）	较好的综合性能，耐冲击，尺寸稳定性好。	一般机械零件，减摩耐磨及传动件
聚甲基丙烯酸甲酯（有机玻璃PMMA） $\left[H_2C-\underset{COOCH_3}{\overset{CH_3}{C}} \right]_n$	透光性好，着色性好，表面硬度差，易擦伤	一般透明件
聚酰胺（尼龙PA）含酰胺基 $\left[\overset{O}{\overset{\parallel}{C}}-NH \right]$ 或芳香酰胺基 $\left[C_6H_4-\overset{O}{\overset{\parallel}{C}}-NH \right]$	坚韧、耐磨、耐疲劳、耐油、耐水、抗霉菌，无毒、吸水性大；可用玻璃纤维增强	一般机械零件，减摩耐磨及传动件
聚甲醛（POM） $\{(CH_2O)\{CH_2O-CH_2O-CH_2\}_n$ 共聚体 $\{CH_2O\}_n$ 均聚体	良好的综合性能，强度、刚性、冲击、疲劳、蠕变等性能均较高，减摩耐磨性好，吸水性小，尺寸稳定性好，可用玻璃纤维增强	减摩耐磨及传动件
聚碳酸酯（PC） $\left[C_6H_4-\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}-C_6H_4-O-\overset{O}{\overset{\parallel}{C}}-O \right]_n$	良好的机械性能，冲击强度和延性好，尺寸稳定性高，无色透明，着色好，吸水性小；耐热性高，但不耐碱、酮、胺、芳香烃，可用聚乙烯等改性	绝缘件、透明件、耐冲击件
聚氯醚（氯化聚醚） $\left[CH_2\underset{CH_2Cl}{\overset{CH_2Cl}{C}}-CH_2O \right]_n$	耐腐蚀性好，摩擦系数低，吸水性小，尺寸稳定性好，低温性能差，可焊接、喷涂	腐蚀介质中的减摩耐磨及传动件，一般机械零件、涂层
聚酚氧 $\left[O-C_6H_4-\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}-C_6H_4-O-CH_2-\underset{CH_3}{\overset{H}{C}}-CH_2 \right]_n$	成型精度高，刚性，硬度，抗蠕变性均较好，冲击强度高，吸水性小，耐热性，耐溶剂性差	精密零件、传动件
聚对苯二甲酸乙二醇酯（线型聚酯PET） $\left[C_2H_4-O-\overset{O}{\overset{\parallel}{C}}-C_6H_4-\overset{O}{\overset{\parallel}{C}}-O \right]_n$	良好的减摩耐磨性能，抗蠕变，刚性、硬度、尺寸稳定性高，绝缘性好，但强度及冲击强度较差，不耐碱，可用玻璃纤维增强	减摩耐磨件、绝缘件、薄膜

续上表

名称（代号、结构式）	主要特点	用途举例
氟塑料 $\{CF_2—CF_2\}_n$ (F－4) 聚四氟乙烯 $\{CF_2—CFCl\}_n$ (F－3) 聚三氟乙烯 $\{(C_2F_4)_x—(CF_2—CF(CF_3))_y\}_n$ (F－46) (F-46)	耐腐蚀性好，耐老化及电绝缘性好，吸水性很小，聚四氟乙烯称"塑料王"，可在－180～250℃长期使用，冷流性大。聚三氟氯乙丙烯，耐腐蚀，耐热，电绝缘性好，聚全氟乙丙烯，有上优点外，且可挤压，模压及注射成型，自粘性好，可热焊	耐腐蚀件、减摩耐磨件、密封件、绝缘件
聚苯醚（PPO） $\{C_6H_2(CH_3)_2—O\}_n$	良好的综合性能，刚性、抗蠕变性及耐热性均较好，可在120℃蒸汽中使用，电绝缘性好，吸水性小，易裂	耐热件、绝缘件、减摩耐磨及传动件
聚酰亚胺（PI） [结构式：$\{N(CO)_2C_6H_2(CO)_2N—C_6H_4—O—O—C_6H_4\}_n$]	优良的综合性能，强度高，抗蠕变，耐热，可在－200～200℃长期使用，减摩耐磨及电绝缘性好，耐辐射、耐稀酸	减摩耐磨及传动件，绝缘件、耐热件、防辐射材料，涂料，绝缘薄膜
聚砜（PSF） $\{C_6H_4—C(CH_3)_2—C_6H_4—O—C_6H_4—SO_2—C_6H_4—O\}_n$	耐热、耐寒、抗蠕变性好，耐酸碱及高温蒸汽、强度高、冲击强度大	耐热件，减摩耐磨传动件，绝缘件
聚苯硫硅（PPS） $\{C_6H_4—S\}_n$	优良的耐热、耐腐蚀及电绝缘性，可在200℃长期使用，稳定性好，胶接强度高	耐热件，耐腐蚀件，绝缘件，密封件

2.2 热固性塑料的特点和用途

热固性塑料的特点和用途见表3.2.1-2。

表3.2.1-2 **热固性塑料的特点和用途**

名称	主要特点	用途
酚醛塑料 主要为塑料粉	耐热性、绝缘性、抗蠕变性均好；冲击硬度高，尺寸稳定性好；耐酸、耐水性好	一般机械零件，绝缘件，耐腐蚀件，水润滑轴承
氨基塑料 主要为塑料粉	优良的绝缘性及耐电弧性，硬度高，耐磨，耐油脂及溶剂，难燃自熄，着色性强，对光稳定	一般机械零件，绝缘件，装饰件
环氧塑料 主要为浇铸料	强度较高，电绝缘性好，耐有机溶剂性好	塑料模，修复机件
聚邻（间）苯二甲酸二丙烯酯塑料 (DAP或DAIP) 有浇铸料及塑料粉	优良的电绝缘性能，在高温高湿下性能几乎不变，尺寸稳定性好，耐酸耐碱及耐有机溶剂，耐热性好，易着色	浇铸料，用于机件灌封与固定 塑料粉，用于耐热件、绝缘件

名　称	主　要　特　性	用　途
聚氨酯塑料 有浇铸料及软质，硬质泡沫塑料	柔韧、耐油、耐磨、易于成型，耐氧、耐臭氧、耐辐射及耐许多化学药品 泡沫聚氨酯，弹性及隔热性好	密封件、传动件。 泡沫聚氨酯，用于隔热、隔声及吸振材料
有机硅塑料有浇铸料及塑料粉	优良的电绝缘性能，电阻高，耐热，耐水性好，防湿耐辐射	浇铸料，用于灌封与固定零件 塑料粉，用于耐热件绝缘件

2.3　塑料的选用

在实际应用中，有时，某些零件往往可能有几种材料合乎应用要求，此时需要分析，选出最佳材料，见表 3.2.1-3。

表 3.2.1-3　　**塑 料 的 选 用**

名　称	零　件　举　例	特　性　要　求	选　用　塑　料
耐磨传动零件	各种轴承、齿轮、蜗杆、齿条、辊子、联轴器等	有较高的强度及热变形温度，刚性、韧性、耐磨性、耐疲劳性均好	各种尼龙、聚甲醛、聚碳酸酯、聚酚氧、氧化聚醚、线型聚酯等
一般结构	罩壳、支架、管接头及手轮、手柄等	强度和耐热性能低，外观美，成本低	改性聚苯乙烯、低压聚乙烯、氯乙烯-醋酸乙烯共聚体（ABS）聚丙烯、醋酸丁酸纤维素等
减摩自润滑零件	活塞环 机械动密封圈 填料函及轴承等	一般受力较小，对机械强度要求不高，但运动速度较高，要求具有低的摩擦系数	聚四氟乙烯和各种填充的聚四氟乙烯、用聚四氟乙烯粉末或纤维填充的聚甲醛等
耐腐蚀部件	容器、管道、泵阀门、管接头、测量用仪表等	耐强酸或强氧化性酸，又要求耐碱	聚四氟乙烯、聚全氟乙丙烯、聚三氟氯乙烯及聚偏氟乙烯等
耐高温零件	高温环境中工作的结构零件	温度可在 150℃ 以上，有的还要求在 260～270℃ 下长期工作	氟塑料、聚苯醚、聚砜、聚酰苯胺、芳香尼龙等

3　塑料成型工艺

塑料成型工艺主要有以下几种：

（1）模压法　先将塑料放入具有一定温度的模具中，然后闭模加压使其在模具中成型并硬化。常用于模压的塑料有酚醛、氨基塑料等。

（2）层压法　用片状填料增强的热固性塑料和热塑性塑料的片材，都能用层压法来制取层压板。

（3）传递模塑　传递模塑是注压和模压相结合而适用于热固性的快速半连续的成型加工方法。由柱塞将加热料筒内的熔融料推向模型，加压热固而得到制品。

（4）注射成型　将颗粒或粉末状塑料置于料筒内加热，使其软化后用推杆或旋转螺杆施加压力，使料筒内的物料自料筒末端的喷嘴注射入所需形状的模具中，然后冷却脱模，得到制件。

（5）挤出成型　借助旋转的螺杆作用，将塑料颗粒或粉末连续地由加料漏斗流入加热料筒，受热软化、受压和通过型模连续地挤出，然后均匀地冷却，得到所需制品。

（6）浇铸成型　将加有填料或未加填料的流动状态树脂倒入具有一定形状的模具中，在常压或低压下置于一定温度的烘箱使其固化。

（7）吹塑成型　先利用挤压法或注射法，将塑料熔融而送入中空的模型中，同时通入压缩空气，使塑料膨胀贴在模型内壁上，冷却后即成中空制品。

（8）旋转模型　将预先称量过的粉末或流体物料放入冷模的下半部，然后闭模并围绕着呈垂直和水平的轴线连续旋转，以使物料均匀地分布到模具的内表面，然后旋转着的模具通过加热炉，使塑料熔融或固化，当还在连续旋转时，模具最后通过冷却室，物料迅速冷却，可得均匀的厚壁空心壳体制件。

（9）涂层法　将热塑性塑料或热固性塑料涂在各种材料上的工艺。这种涂层工艺有擦涂、浸涂、辊涂等方法。新发展的有流动床涂层、电离涂层和喷涂。

4　塑料的粘接

常用的塑料的粘接方法有3种，即热熔粘接、溶剂粘接和胶粘剂粘接。

热固性塑料因受热不熔融、溶剂不溶解，不能用热熔法和溶剂法粘接，只能用胶粘剂粘接。而很多热塑性塑料则3种方法都可用，并且能粘接到热固性塑料或金属、陶瓷、玻璃、橡胶以及其它材料上。

粘接件的粘合面必须清洁干燥，不可有油污、灰砂、杂质，有些塑料只需用丙酮、甲醇、三氯乙烯等溶剂擦拭清除油脂即可，有些要用砂纸、砂布或喷砂清除及使表面粗糙，有些还须化学处理使表面活化，以提高粘接强度。金属、陶瓷、玻璃等其它材料也需适当处理。

5　塑料的机械加工

塑料的机械加工性能较好，易切削，其主要缺点是散热性差，弹性大，加工时易引起零件变形且加工面粗糙。必须从以下几方面注意：刀具的前角及后角比加工金属材料要大，刀口要锋利；要有足够的冷却，可用风冷或水冷；精加工时，夹紧力不宜过大。为使表面质量较好，需要用高的切削速度和小的进刀量。

（1）车削　塑料在车床上加工，其切削用量决定于塑料的性质。车削热塑性塑料时，温度不能超过塑料的软化点。在高速度下进行车削时，宜用空气冷却。车削一般塑料宜用白钢刀具，对玻璃纤维增强塑料，最好用硬质合金刀具。塑料零件可以在车床上滚花。

（2）铣削　用加工金属材料的高速钢铣刀，即可铣削塑料，在选择铣刀时，尽量选用前角大，刀齿少的刀具，最好用镶片铣刀。铣削时要注意足够的冷却。

（3）钻孔　用一般加工金属材料的钻头，即可加工塑料零件上的孔。钻削时要冷却，并经常退屑，否则容易引起出屑不好而产生热量，将钻头“咬死”在孔内。

（4）扩孔　最好用螺旋槽扩孔钻或铰刀扩孔。用直槽扩孔钻或铰刀扩孔时，要有导向装置。如在钻床上先钻孔，再用直槽铰刀铰孔时，用顶尖顶住铰刀尾部的中心孔（即导向），才能准确扩好。

（5）攻螺纹　在塑料件上攻螺纹前，钻底孔的钻头直径，选用在钢材上攻螺纹的钻头直径，攻螺纹时可直接用两攻（一套2只丝锥）或三攻（一套3只丝锥）来攻螺纹。如连续攻螺纹时，丝锥要进行冷却。

（6）刨削　刨削塑料基本上与车削情况相仿，但刨刀的后角要小，否则退刀时刨刀会跳动。修理机床的塑料覆面，可用宽刃刨刀加工，但刨床的行程要慢，切深要小。

（7）锯割　塑料的板、棒、管材的锯割，可用弓型锯床，锯割时要冷却。锯条要用粗齿的。

6 选用工程塑料时注意事项

（1）对所采用的零件的工作条件作充分地了解和分析，从而选定最适当的树脂和填料类型及配比，以期得到所需要的性能，然后选定最适当的成型方法。

（2）由于塑料的导热性差，不易散热，其应用范围受到了一定的限制。因此，在选用时必须特别注意设计最有利的散热条件。

（3）由于塑料的耐热性差，热膨胀系数大，易于受热而膨胀变形，因此在设计塑料零件时应考虑到要有足够的配合间隙。

（4）工程塑料一般都易吸湿吸水，特别是聚酰胺更为显著，往往因吸湿吸水而影响制件的尺寸稳定性和物理-机械性能，在选用时必须考虑到这一点。

（5）塑料是一种非刚性材料，在选用时必须考虑它的蠕变性，在设计和制造塑料制件时必须预料到蠕变和出现内应力的可能性。填加玻璃纤维可明显地改善其蠕变稳定性。

（6）塑料和金属材料一样，每种工程塑料均有其最高的可能使用负荷及旋转速度。选用塑料轴承时，必须注意这一点。

（7）塑料在受到光和氧作用后，分子内部会发生降解或交联，使其物理-机械性能变坏，甚至丧失使用价值，即塑料的老化。可填加防老剂以改善塑料性能。

7 塑料在轮机工程中的应用

7.1 轮机中的塑料零、部件

玻璃钢可用来制造快艇、工作艇、救生艇、上层建筑、驾驶室、棚顶、门壁、风斗、黄砂箱、瓦楞板以及导流罩、导流帽、螺旋桨等。

尼龙可用来制造尾轴承、舵轴承、导流帽、阀盘、齿轮、滑块、滑轮、插销、手柄、舷窗等。

此外，可用ABS塑料管、硬质聚氯乙烯塑料管作船舶常温低压管路；用泡沫塑料做舱室绝热隔声材料和救生浮具等；用自干性浇铸型聚氨酯弹性塑料和以聚氯乙烯为主要成分的油地毡作舱室地板、以及聚氨酯弹性体塑料与核桃壳、沥青、废橡胶等配合使用代替木甲板；用聚氯乙烯塑料作扶手；用ABS塑料制造船用热水瓶架等。

常温工作条件下的活塞环，载荷小的一般装置中的齿轮都可用塑料制成。船舶主辅机中的离合器片和刹车片都是摩擦片，它可以用塑料为基础制成。船舶主辅机和设备中，旋转或往复运动的零件与固定零件之间，总有一定的缝隙，为了阻止工作介质的漏泄，可用塑料密封。

7.2 塑料在防腐中的应用

（1）螺旋桨涂塑料防腐　螺旋桨长期受海水的浸入和空泡腐蚀，使叶尖和叶面部分腐蚀得非常厉害。采用涂塑料防腐可取得一定的效果，但还存在着耐空泡腐蚀差，附着力不够强等缺点。

（2）尾轴包玻璃钢防腐　船舶尾轴两轴颈中间一段非摩擦表面的防腐，一般采用镶压铜套或包扎橡胶，但工艺复杂，成本高。目前采用包玻璃钢防腐新工艺，环氧玻璃钢具有良好的防腐性能，在各种介质中性能稳定；且工艺简单，局部损坏易修补。

（3）水舱防腐　船舶水舱原来涂薄层水泥防腐时，容易脱落生锈，影响水质。现采用塑料防腐，经实船考验，防腐效果好，且可作局部修理，节约工时。

（4）柴油机水隔套防腐　柴油机气缸冷却水腔长期使用后会局部腐蚀，采用塑料涂层后，能起一定的防腐作用。

（5）舵叶防腐　高速艇的舵叶在海水中工作，会产生严重的电化学腐蚀，影响航行。塑料涂层能提高耐腐蚀性。

（6）与海水接触机件的内壁防腐　与海水接触的机件，如管内壁、主机循环泵内壁、冷凝器及海水制淡水器内壁等，极易腐蚀。塑料涂层涂于内壁面，即可延长机件的使用寿命。

第2章 胶 粘 剂

1 胶粘剂的分类和特点

1.1 胶粘剂的组成

胶粘剂通常由几种材料配制而成。这些材料按其作用不同，一般分为主体材料和辅助材料。

主体材料是在胶粘剂中起粘接作用并赋予胶层一定机械强度的物质，如各种树脂、橡胶等合成高分子材料以及淀粉、蛋白质、磷酸盐、硅酸盐等。

辅助材料是胶粘剂中用以改善主体材料性能成为便于施工而加入的物质，常用的有固化剂、增塑剂、填料和溶剂等。

1.2 胶粘剂的分类

由于胶粘剂品种繁多，目前还没有统一的分类方法。表3.2.2-1所列为胶粘剂的综合分类。

1.3 胶粘技术的特点

它与铆接、焊接、螺钉联接等方法相比，有如下特点：

（1）可以胶粘不同性质的材料。

（2）可以胶粘异型、复杂部件及大的薄板结构件。

（3）胶粘件外形平滑。

（4）胶粘接头有较高的剪切强度。

（5）胶粘接头有良好的疲劳强度。

（6）胶粘接头具有优异的密封、绝缘和抗腐蚀等性能。

（7）缺点是粘接接头抗剥离强度、不均匀扯离强度和抗冲击强度较低，耐老化性较差。多数胶粘剂的耐热性不高。胶粘工艺中，对被粘材料的表面处理要求较严。目前还没有简便可行的无损检验方法。

2 胶粘剂的性能

1)胶接强度　主要有抗剪、扯离与不均匀扯离、剥离等。对于硬质材料的胶接，主要测试抗剪、扯离和不均匀扯离强度。对于软质材料，或软质材料与硬质材料的胶接，测试剥离强度。

2)耐热性　胶粘剂允许使用的温度范围，或某一温度下测出的胶接强度。

3)耐介质腐蚀性　试件浸置在一定温度的介质中，一定时间之后，测试其胶接强度的变化。

4)耐老化性　用来衡量胶粘剂的使用寿命，一般有：

（1）高温老化　将试件放在高温下，保持一定时间后，测试胶接强度。

（2）人工老化　将试件放在模拟的加速老化条件下，保持一定时间后，测试胶接强度。

表 3.2.2-1 胶粘剂的综合分类

- 胶粘剂
  - 合成胶粘剂
    - 热固性树脂胶粘剂
      - 酚醛树脂胶粘剂
      - 氨基树脂胶粘剂
      - 环氧树脂胶粘剂
      - 聚氨酯树脂胶粘剂
      - 不饱和聚酯及丙烯酸聚酯树脂胶粘剂
      - 有机硅树脂胶粘剂
    - 热塑性树脂胶粘剂
      - 乙烯基树脂胶粘剂
      - 丙烯酸树脂胶粘剂
      - 尼龙胶粘剂
      - 线型聚酯胶粘剂
      - 硝基纤维胶粘剂
      - 芳杂环树脂胶粘剂
      - 含氟树脂胶粘剂
    - 橡胶胶粘剂
      - 天然橡胶胶粘剂
      - 聚异丁烯及丁基橡胶胶粘剂
      - 氯丁橡胶胶粘剂
      - 丁腈橡胶胶粘剂
      - 聚硫橡胶胶粘剂
      - 硅橡胶胶粘剂
    - 特种胶粘剂
      - 热熔胶粘剂
      - 压敏胶粘剂
      - 点焊胶粘剂
      - 吸水胶粘剂
      - 导电胶粘剂
      - 厌氧胶粘剂
      - 应变胶粘剂
      - 液态密封胶及制动胶粘剂
  - 天然胶粘剂
    - 动物胶粘剂
      - 动物蛋白胶（皮胶、骨胶、血阮胶等）
      - 虫胶胶粘剂
    - 植物胶粘剂
      - 淀粉胶粘剂
      - 植物蛋白胶粘剂
      - 树脂胶（松香、桃胶等）
    - 矿物胶粘剂
      - 硫磺胶粘剂
      - 沥青胶粘剂
      - 蜡质胶粘剂
  - 无机胶粘剂
    - 硅酸盐胶粘剂
      - 硅酸钠胶粘剂
      - 其它硅酸盐胶粘剂
    - 磷酸盐胶粘剂
      - 磷酸氧化铜胶粘剂
      - 磷酸铵胶粘剂
    - 磷腈树脂胶粘剂
      - 磷腈树脂胶粘剂
      - 改性磷腈树脂胶粘剂

（3）大气老化　将试件长期暴露在大气条件下，定期测试胶接强度。

常用的胶粘剂组成及性能如表 3.2.2-2 及表 3.2.2-3 所例。

表 3.2.2-2　**吸水胶粘剂组成及性能**

牌　号	组分与配比（重量比）	固化条件	性　能	用　途
水下胶粘剂 1 号	E-44 环氧树脂 100 聚酯树脂 702 号 10～20 生石灰（160 目）50 二乙烯三胺 10 石油磺酸 0～5	水下常温固化	1）剪切强度（MPa）：钢 16.17 2）抗拉强度（MPa）：纯胶：13.6～29.2	舵、尾管堵漏，船体裂缝、孔洞等临时修补
水下胶粘剂 2 号	E-42 环氧树脂 100 生石灰（160～180 目）50 双丙酮丙烯酰胺与二乙烯三胺按 1：1 摩尔比缩合而成物 40 石油磺酸 5	水下常温 5～24 h	剪切强度（MPa）： 钢：固化 2 h，3.92 固化 5 h，11.9 固化 24 h，18.4	同水下胶粘剂 1 号
环氧-乙二胺氨基甲酸酯吸水固化胶	E-42 环氧树脂 100 乙二胺氨基甲酸酯 15 生石灰 40 熟石灰 20 石棉粉 20 水 10	常温吸水固化 24 h	剪切强度（MPa）：钢 14.7	同水下胶粘剂 1 号

表 3.2.2-3　**液态密封胶粘剂组成及性能**

牌号名称	外　观	组分与配比（重量比）	使用方法	性　能	用　途
液体尼龙密封填料	乳白色粘稠液	尼龙、乙醇等	室温涂胶放置 5 min装配	1）在-60～+250℃耐压最大 29.4 MPa 2）耐各种油类，不耐苯、醇、酮、浓酸、浓碱和沸水等 3）耐震动、冲击 4）无毒、无腐蚀、去除后不能再用	可代替各种固体垫片，但最好和固体垫片连用
1 号密封胶	粘稠液体	邻苯二甲酸酐，丙二醇聚酯等 用 2,4-TDI改性加填料溶剂等	室温涂胶溶剂挥发后连接	1）耐汽油、煤油、润滑油、氟里昂、机油等 2）抗震动，冲击性好 3）能在 6.86 MPa、150℃下工作	法兰盘处连接代替固体垫圈
2 号密封胶	粘稠液体	己二铵、丙二醇聚酯用 2,4-TDI改性加填料、溶剂等	同 1 号密封胶	1）耐汽油、煤油、机油性好 2）能在 6.86 MPa、200℃下工作	同 1 号密封胶
8 号密封胶	同 2 号密封胶	氯丁橡胶加少量酚醛树脂、填料、防老剂、溶剂等	同 1 号密封胶	1）价廉，耐油性好 2）能在 6.86 MPa，200℃下工作	同 1 号密封胶

续上表

牌号名称	外　观	组分与配比 (重量比)	使用方法	性　　能	用　　途
9号密封胶	同2号密封胶	丁腈-26橡胶加入少量酚醛树脂、填料、防老剂、溶剂	同1号密封胶	1)能成膜、耐油性很好 2)弹性好、粘接力强 3)能在9.8 MPa、250℃下工作	同1号密封胶
铁锚601胶	黄色粘稠液体	聚酯型聚氨脂,填料及溶剂组成	同1号密封胶	1)耐油,耐介质性好 2)耐热性为250℃左右	法兰盘密封
铁锚602胶	灰色粘稠液体		同1号密封胶	1)耐油性较好 2)耐热性达250℃以上	法兰盘密封
铁锚603胶(W-1胶)	蓝或浅灰色液	聚醚聚氨酯聚醚环氧树脂	不干胶、无溶剂,室温涂覆	1)耐热160℃ 2)耐压1.27 MPa 3)耐油性良好	油泵密封
铁锚609胶	蓝或浅灰色液	酚醛、丁腈、填料和溶剂等组成	不干胶、无溶剂,室温涂覆	1)耐油性良好 2)耐热性达280℃以上	油泵密封
XM-17密封腻子		低分子顺丁橡胶 100 石棉绒 135 磷酸三丁酯 5 三氧化二铬 5 防老剂D 4.5	室温刮涂	1)剪切强度(MPa):铅≥0.04 2)使用温度:-55～+100℃	用于夹层铆接、螺栓、栓孔及镶玻璃缝隙密封
XM-21密封胶	黑色混炼胶	丁腈-40 60 620基料 107 过氧化氢二异丙苯 1 硬脂酸 5	混炼可用15天	1)使用温度-50～+130℃ 2)对镁合金有微腐蚀,但不影响使用	燃油箱内缝密封
XM-22密封胶	黑色糊状	22号基膏 F-44环氧树脂 11号硫化膏 促进剂D	使用时配制2～6 h凝固,一般刮涂	使用温度:-50～+130℃	用于尺寸大,不便于加热的密封油箱
XM-23密封胶	黑色膏状	23号基膏 F-44环氧树脂 10硫化膏 二苯胍	使用时配制2～15 h凝固,室温硫化7天或100℃8 h	使用温度:-50～+130℃	空气、燃油、海水接触的螺栓,铆钉等密封防腐蚀
XM-18密封胶	黑色膏状	18基膏 94.5 F-44环氧树脂 1.5 10号膏 6 二苯胍 0.7～1.5 组成: 聚硫05 77 沉淀白炭黑 8 气相白炭黑 8 酚醛树脂 1.5	使用时配制1.5～2 h凝固,常温硫化10天或100℃下硫化8 h	1)相对伸长率(%)≥550 2)使用温度:-60～+150℃ 3)耐油性极好	耐油密封用及螺钉铆接缝内密封

3 胶粘工艺中应注意的几个问题

胶粘工艺一般有以下几道工序：

确定胶粘接头的形式──→胶粘面加工──→胶粘面清洁处理──→上胶──→叠合──→固化。

由于胶接工艺的复杂性，所以在胶粘工件时，不仅要熟悉各种类型的胶粘剂，而且还要了解工艺过程中的各种问题。

3.1 正确选择连接方式

首先对各种可能的连接方式进行全面地比较，并正确地加以选择。如何选择胶接，则必须考虑成功的可能性以及胶接工艺的优缺点。

3.2 重视接头的设计和被粘材料的表面处理

被粘物的表面处理在很多情况下是胶接成功的关键。同时在许多情况下改进胶接接头设计的意义不亚于提高胶粘剂的性能。

采取嵌接、套接等比较复杂的接头形式，不仅可以增加胶粘面积，还可以提高接头的抗冲击和抗剥离的能力。

3.3 合理选择胶粘剂

胶粘剂品种繁多，性质不一，在选择胶粘剂时，必须根据材料性能的要求选择适用的胶粘剂，只有使用得当才能发挥其长处。各种材料的适用胶粘剂见表 3.2.2-4

表 3.2.2-4　　各种材料的适用胶粘剂①

胶粘剂 \ 胶接件材料	金属（钢、铁、锰、②铜）	热固性塑料及其增强塑料	硬聚氯乙烯	软聚氯乙烯	聚乙烯、聚丙烯	聚四氟乙烯	聚酰胺（尼龙）	聚甲醛	ABS	天然橡胶、丁腈橡胶	氟硅橡胶	玻璃、陶瓷	混凝土	木材	皮革	聚碳酸酯
聚醋酸乙烯酯													良	优	良	
聚氯乙烯-醋酸乙烯	可		良	优										良	可	
聚丙烯酸酯	良	良	可	—	—	—	—	—	可	可③	—	良	—	—	良	良
2-氰基丙烯酸酯	良	良	可	可	可③	可③	可③	—	良	良③	—	良	—	—	—	良
聚氨酯	良	良	良	可	可③	可③	可	良	良	良③	—	可	—	优	优	良
脲醛	—	可	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	优	—	—
胺类固化	优	优	—	—	可③	可③	可③	良	良	可③	—	优	良	良	可	—
环氧																
酸酐-咪唑固化	优	优	—	—	—	—	—	—	—	—	—	优	良	良	可	良
环氧丁腈	优	良	—	—	—	—	—	—	可	可③	—	良	—	—	—	—
酚醛-缩醛	优	优	—	—	—	—	—	—	—	—	可③	—	良	—	—	—
酚醛-丁腈	优	良	—	—	—	—	可③	—	—	可③	—	良	—	—	—	—
酚醛-氯丁	可	可	—	—	—	—	—	—	—	优	—	—	可	可	可	—

续上表

胶粘剂＼胶接件材料	金属（钢、铁、锰、铜②）	热固性塑料及其增强塑料	硬聚氯乙烯	软聚氟乙烯	聚乙烯、聚丙烯	聚四氟乙烯	聚酰胺（尼龙）	聚甲醛	ABS	天然橡胶、丁腈橡胶	氟硅橡胶	玻璃、陶瓷	混凝土	木材	皮革	聚碳酸酯
氯丁橡胶	可	可	良	可	—	—	—	—	可	优	—	可	—	良	优	—
硅橡胶	可	可	—	—	—	—	优	—	—	—	优	可	—	—	—	—
含氟胶	可	—	—	—	—	优	—	—	—	—	优	—	—	—	—	—
聚酰亚胺	良	良	—	—	—	—	—	—	—	—	—	良	—	—	—	—
聚苯并咪唑	良	良	—	—	—	—	—	—	—	—	—	可	—	—	—	—
聚异丁烯	—	—	—	可	可	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
无机胶	可	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	优	—	—	—	—

① 两种不同材料的胶接，可选择两种材料共同适用的胶粘剂。

② 在金属材料中，铜的胶接强度最低。

③ 胶接件经化学处理后，强度可相应提高，如聚乙烯、聚丙烯、聚甲醛用硫酸-重铬酸钾溶液处理，聚四氟乙烯用萘-钠处理，聚酰胺用苯酚处理，橡胶用浓硫酸处理。

3.4 胶粘剂配方的改进

如果查明胶粘失败并非由于接头设计或表面处理不善等工艺因素所引起，则应考虑改进所选用的胶粘剂的性能或另选合适的胶粘剂。

改进胶粘剂的配方应该根据具体情况而定。通常有两种情况：一、若要增加橡胶型胶粘剂的强度，通常采取的办法是增加分子之间的作用力，这时引入极性基团或者加入极性较大的树脂都是有效的。二、对于酚醛树脂、环氧树脂或其它脆性胶粘剂来说，增加胶接强度的有效办法是减小胶接过程中所产生的内应力，或者增加胶层的韧性。

4 胶粘剂在轮机工程中的应用

4.1 胶粘剂在改进安装工艺上的应用

1)螺旋桨轴与螺旋桨采用环氧胶粘剂安装　这样会具有一定强度、收缩率小、粘接力大、抗腐蚀性和工艺性好。减轻劳动强度，缩短工期。

2)主副机垫片涂环氧树脂代替拂刮　这种工艺不仅对金属有较大的粘接力，而且有一定的抗压、抗冲、抗剪等机械性能。安全可靠。

3)主辅机普通螺栓涂环氧胶粘剂代替铰孔螺栓　采用环氧胶粘剂使接触面增加到90%以上，工效也将提高。

4)倒顺车电磁离合器胶合　这样可以消除相对转动，减少零件折断。

其它还有螺旋桨轴管斜法兰填充环氧胶粘剂代替浇铅，主机导板用环氧塑料校正中心，船用旋塞涂有机硅胶粘剂密封，管道、管牙密封，粘固各种套件以代替压配合、摩擦片胶合等等。

4.2 胶粘剂修复

1)裂纹与裂断的修复　主机的机座、机架、气缸体、气缸盖、曲轴箱等，由于长期受负荷作用或由于制造质量较差，工作一个时期后会产生裂纹，甚至断裂。但因这些机件的材料大部分是铸铁的，很难用焊补修复，而采用胶粘剂则可以修复。

2)机件腐蚀后的修补　船用机件使用一段时间后，其零件与设备都会遭受不同程度的腐蚀。如果严重就要修理或换新。目前采用胶粘剂、塑料修补可以不停机器就完成。

3)磨损零件的修复　主辅机机械零件工作一段时间后，由于各种原因会产生不同程度的磨损。采用塑料、胶粘剂修复机件的磨损是一项经济的方法。

4)水下修补　船舶在航行中，水下部位的船体或水舱、水箱等容器发生渗漏时，必须及时抢修，才能确保安全。目前采用的水下胶粘剂主要为环氧一类的树脂，其中加入适量的具有吸水性能或能与水起化学反应的辅助剂来实现的。

5)零件其它方面损坏后的修理　主辅机机械零件还往往因铸件铸造质量差而产生组织疏松、气孔等缺陷，另外由于加工时不慎及其它原因也会产生废品或零件损坏。可适当选用塑料、胶粘剂进行修复。

第3章 橡　　胶

1 橡胶的分类

表3.2.3-1是橡胶的分类。

表3.2.3-1　　　　橡胶的分类

分类方法	分类名称	分类说明
按橡胶来源	天然橡胶	采集含胶植物中的胶液，经一定加工而成。目前只占橡胶总产量的1/3左右
	合成橡胶（人造橡胶）	以石油化工产品为原料，经化学反应而获得高分子聚合物制造而成。是现代橡胶工业的主要原料来源
按橡胶的用途	通用橡胶	指产量大，应用广，在使用上无特殊要求的通用性橡胶，主要有：天然橡胶、丁苯橡胶、顺丁橡胶、异戊橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶等
	特种橡胶	指用于特殊用途上的橡胶，如耐油、耐酸碱、耐高温、耐低温、耐辐射等。主要有：乙丙橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶、丙烯酸酯橡胶、聚氨酯橡胶、硅橡胶、氟橡胶、聚硫橡胶、氯醇橡胶、氯化聚乙烯橡胶等
按橡胶的物理状态	生橡胶（生　胶）	指天然采集或人工合成未加配合剂的原始胶料，不能直接使用
	熟橡胶（橡胶、软橡胶、橡皮）	指生胶中加入各种配合剂，经加工而制成的具有实用性能的橡胶产品
	再生胶	是以由橡胶制品为原料，经一定的加工过程而制成的翻新橡胶
	混炼橡胶（胶　料）	指在生胶中加入某种配合剂，经过机械作用的混合后使其具有所需的物理机械性能的半成品
	硬橡胶（硬质橡胶）	是在生胶中加入大量硫磺，经硫化处理后而制成的产品。具有高硬度和高强度、优良的电绝缘性以及对某些酸、碱和溶剂的高稳定性
	液体橡胶	当前主要用作胶粘剂、涂料、密封材料、火箭燃料。由于加工成形方便，将给橡胶制品的加工工艺带来新的变革

2 橡胶制品的主要性能指标

表3.2.3-2为橡胶制品的主要性能指标

表3.2.3-2　　　　橡胶制品的主要性能指标

性　能	单　位	含　意
扯断强度	MPa	被扯断时，单位面积上所需的力
扯断伸长率	%	被扯断时，拉伸所增加的长度和原来长度的比值
扯断永久变形	%	拉伸扯断后，停放一段时间（3 min）测量变形部分所增加的长度与原来长度的比值
冲击弹性（回弹性）	%	用摆锤在一定的高度冲击橡胶，弹回的高度与原来高度的比值
定伸强度	MPa	把橡胶伸长到一定长度即100%、200%、300%和500%所需的力，用以表示强韧性
邵氏硬度	分度为0-100	抵抗外来压力侵入的能力，常用邵尔A表示
抗撕裂值	N/mm	单位厚度(mm)的橡胶，在切口发生撕裂致断时受的力
附着力与附着强度	N/mm	橡胶制品两结合面间（如胶布与布层或布层与布层）分离时所需的力，用单位宽度上所需外力表示

续上表

性　　能	单　位	含　　　意
曲挠剥离次数	次/全剥	将试样反复多次曲挠后，以其两结合面间全部剥离时的曲挠次数表示
磨耗量	cm^3/km	使橡胶与砂轮（标准）进行摩擦，测量在一定行程内的磨损量，用以表示耐摩性
脆性温度	K或℃	把橡胶经低温冷冻一段时间后，用一定的外力冲击，橡胶开始断裂时的温度即脆性温度，是耐寒性指标
裂解温度	K或℃	是耐热性指标，指受热高达一定温度后，胶体开始裂解
老化与老化系数		橡胶长期在日光、热、氧、臭氧、大气等作用下，产生物理和机械性能劣化的现象叫老化，老化系数是衡量耐老化能力的指标
耐辐射性		橡胶在射线辐照之后，性能都显著下降，特别是伸长率。耐辐射性即表示抵抗射线辐照的能力
收缩率	%	橡胶制品在硫化后都要收缩，一般收缩率为1%～1.5%
耐酸（或耐碱）系数		是衡量抵抗酸或碱腐蚀能力的性能指标
耐油系数		是衡量耐油性的指标
质量（或体积）膨胀率	%	把橡胶浸入酸或碱、油等介质中，在一定温度下，经一定时间后，以其所增加的质量（或体积）与原质量（或体积）的比值表示

3　常用橡胶的种类和性能

表3.2.3-3～表3.2.3-6为常用橡胶的种类及性能。

表3.2.3-3　　　　**常用橡胶的种类及性能**

橡胶品种		抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	100%定伸强度(MPa)	200%定伸24h，后永久变形(含碳黑)(%)	压缩永久变形	抗撕性	回弹性	最高值用温度(℃)	常用时的温度上限(℃)	脆性温度(℃)
通用橡胶	天然	25～35	650～900	—	8～12	良	优	优	120	70～80	−50～−70
	丁苯	15～20	500～800	0.7～0.9	10～15	良	良	良	120	80～100	−30～−60
	异戊	20～30	600～900	—	—	良	良～优	优	120	70～80	−50～−70
	顺丁	18～25	450～800	1.0～4.0	—	优	可～良	优	120	—	−73
	丁基	17～21	650～800	—	11	优	良	可	170	150	−30～−55
	氯丁	25～27	800～1000	—	7.5	良	良～优	良	150	120	−35～−42
	丁腈	15～30	300～800	—	6	良	良	良	170	120	−10～−20
特种橡胶	聚氨脂	20～35	300～800	—	—	可	良	良	80	—	−30～−60
	三元乙丙	15～25	400～800	—	—	可～良	良～优	良	150	150	−40～−60
	聚硫	9～15	100～700	4.2～7.0	—	劣	劣～可	劣	130	80	−10～−40
	丙烯酸酯	7～12	400～600	5.0～7.0	—	优	可	可	175	170	0～−30
	氯醇	—	—	良	—	—	—	—	—	—	—
	氯磺化聚乙烯	7～20	100～500	2.1～21.0	—	劣	可～良	良	150	100	−20～−60
	硅	4～10	50～500	—	—	劣	劣～可	劣	315	200	−70～−120
	氟	20～22	100～500	1.0～2.1	—	劣～可	良	可	315	200	−10～−50

表 3.2.3-4　　橡胶在各种介质中的耐蚀性

	橡胶品种	有机酸	高浓度无机酸	低浓度无机酸	高浓度碱	低浓度碱	普通汽油	合成润滑油	臭氧
通用橡胶	天然	劣	劣	良	良	良	显著溶胀	轻微～中等溶胀	劣
	丁苯	劣	劣	良	良	良	显著溶胀	轻微～中等溶胀	劣
	异戊	劣	劣	良	良	良	显著溶胀	轻微～中等溶胀	劣
	顺丁	劣	劣	良	良	良	不适用	—	劣
	丁基	劣～良	优	优	优	优	显著溶胀	轻微～中等溶胀	优
	氯丁	劣～可	良	优	优	优	轻微～中等溶胀	显著溶胀	优
	丁腈	劣～可	可	良	良	良	适用	轻微～中等溶胀	劣
特种橡胶	聚氨脂	劣	劣	可	劣	劣	适用	轻微～中等溶胀	优
	三元乙丙	劣	良	优	优	优	不适用	—	优
	聚硫	劣	劣	可	可	可	适用	轻微～中等溶胀	优
	丙烯酸脂	劣	可	良	可	良	不适用	—	优
	氯醇	—	—	—	—	—	—	—	优
	氯磺化聚乙烯	可	可	优	优	优	显著溶胀	显著溶胀	优
	硅	良	良	可	优	优	显著溶胀	不适用	优
	氟	劣	劣	优	可	良	适用	优	优

表 3.2.3-5　　橡胶的体积电阻率　(Ω · m)

橡胶品种	体积电阻率	橡胶品种	体积电阻率	橡胶品种	体积电阻率
天然	10^{16}～10^{18}	丁腈	10^{12}～10^{13}	氯磺化聚乙烯	10^{16}
丁苯	10^{16}～10^{18}	聚氨脂	10^{11}～10^{14}	氯化聚乙烯	—
异戊	10^{16}～10^{18}	三元乙丙	10^{10}	硅	10^{17}～10^{19}
顺丁	10^{16}～10^{18}	聚硫	—	氟	10^{15}～10^{16}
丁基	10^{17}～10^{19}	丙烯酸脂	10^{8}～10^{10}		
氯丁	10^{12}～10^{14}	氯醇	—		

表 3.2.3-6　　气体在橡胶中的气透常数 [10^{-8}ml/(s · cm² · cm)]

橡胶品种	氧　气	氮　气	二氧化碳	氢　气	甲　烷
天然	18.0～19.5	0.6～22.5	102.0～220.0	39.0～97.0	22.0～64.0
丁苯	13.0～34.5	4.8～14.5	94.0～195.0	30.5～74.0	16.0～43.0
丁基	0.3～1.0	0.11～0.35	0.03～0.10	0.03～0.10	0.01～0.03
氯丁	3.0～16.0	0.9～3.55	10.3～28.5	10.3～28.5	2.5～9.8
丁腈	3.2～10.5	0.9～3.7	11.5～31.5	11.5～31.5	2.4～10.1

4 橡胶的选用

橡胶的选用见表 3.2.3-7。

表 3.2.3-7 橡胶选用参考表①

品种 选用顺序 使用要求	天然橡胶	丁苯橡胶	异戊橡胶	顺丁橡胶	丁基橡胶	氯丁橡胶	丁腈橡胶	乙丙橡胶	聚氨脂橡胶	丙烯酸脂橡胶	氯醇橡胶	聚硫橡胶	硅橡胶	氟橡胶	氯磺化聚乙烯橡胶	氯化聚乙烯橡胶
高强度	A	C	AB	C	B	B	C	C	A					B	B	
耐磨	B	AB	B	AB	C	B	B	B	A	C			C	B	AB	B
防震	A	B	AB	A		B		B	AB				B			
气密	B	B	B		A	B	B	B	B	B	B	AB	C	AB	B	
耐热		C		C	B	B	B	B		AB	B		A	A	B	C
耐寒	B	C	B	AB	C	C		B	C				A		C	
耐燃						AB							C	A	B	B
耐臭氧					A	AB		A	AB	A	A	A	A	A	A	A
电绝缘	A	AB			A	C		A					A	B	C	C
磁性	A						A									
耐水	A	B	A	A	B	A	A	A	C		A	C	B	A	B	B
耐油						C	B		B	AB	B	A		A	C	C
耐酸碱					AB	B	C	AB		C	B	BC		A	C	B
高真空					A		B②							B		
制品举例	轮胎、胶管、胶带、通用制品	主要用以代替天然橡胶	可以代替天然橡胶	轮胎运输带和特殊耐寒制品	内胎,水胎,汽球,绝缘、耐酸碱设备衬里,防震、耐热、耐老化胶布	垫圈,密封圈,抗臭氧、耐老化电缆护套,耐化学腐蚀的胶管	各种耐油制品垫圈油管	耐酸碱设备衬里、蒸汽胶管、绝缘体	耐油零件垫圈、防震制品、高强度耐磨和耐油制品。	密封件、耐热油软管、耐酸碱设备衬里	是制作油封、水封的理想材料	综合性能差、易燃,多用作密封腻子或油库覆盖层	耐高低温零件、绝缘件。无毒、无味	高级密封件、高真空胶件、化工衬里。价格昂贵	臭氧发生器上的密封垫圈、耐油垫圈、耐腐蚀件	电缆护套、胶管胶带耐酸碱设备衬里

① 选用顺序可按A→AB→B→BC→C进行。

② 高丙烯腈成分的丁腈橡胶。

5 工业用橡胶制品的分类及应用

工业用橡胶制品的分类及应用见表 3.2.3-8。

表 3.2.3-8　　橡胶制品的分类及应用范围

<table>
<tr><th>类别</th><th colspan="2">分类名称</th><th>应用范围</th></tr>
<tr><td>轮胎</td><td colspan="2">空心胎
实心胎</td><td>各种轮胎</td></tr>
<tr><td>胶带</td><td colspan="2">运输带：有普通、花纹、特殊性能、特种骨架材料钢缆、折迭式等运输带</td><td>传送物料</td></tr>
<tr><td rowspan="6">胶管</td><td colspan="2">布胶管：耐压、吸引、耐压吸引</td><td>压力不大条件下输送各种物料</td></tr>
<tr><td colspan="2">编织胶管：棉线编织、钢丝编织</td><td>压力不大条件下输送各种物料、耐压强度高</td></tr>
<tr><td colspan="2">缠绕胶管：棉线缠绕、钢丝缠绕</td><td>压力不大条件下输送各种物料、耐压、高强度</td></tr>
<tr><td colspan="2">针织胶管</td><td>柔软、轻便、只适于低压条件下工作</td></tr>
<tr><td colspan="2">全胶管：有普通、真空、优级三种</td><td>用于输送液体或气体</td></tr>
<tr><td colspan="2">专用胶管和特种胶管</td><td>品种繁多，按订货者提出的规格和技术条件供应</td></tr>
<tr><td rowspan="7">其它工业用橡胶制品</td><td rowspan="3">密封制品</td><td>橡胶密封制品：油封、O形圈、各种断面密封圈、皮碗、皮圈、密封条、垫片、隔膜等</td><td>用作密封机构的构件</td></tr>
<tr><td>螺旋盘根</td><td>用于往复活塞杆、阀杆、泵的挺进杆上低压蒸汽、热水、高压冷水和煤气等介质的密封</td></tr>
<tr><td>橡胶腻子</td><td>用作嵌缝密封</td></tr>
<tr><td colspan="2">橡胶减震制品</td><td>减轻机械震动、减少噪声</td></tr>
<tr><td colspan="2">胶板</td><td>制造垫圈缓冲垫板等，也可用于铺地</td></tr>
<tr><td colspan="2">胶布及胶布制品</td><td>防护胶布、劳动制品、贮运用具，救生圈橡皮船、浮筒、气囊等</td></tr>
<tr><td colspan="2">橡胶绝缘制品</td><td>绝缘安全用具，如手套、地毯等</td></tr>
</table>

6 工业用橡胶板和密封橡胶制品的类型、牌号和使用范围

橡胶板常见的有橡胶平板、夹布橡胶平板和花纹胶板 3 种。橡胶平板和夹布橡胶平板用于制造机器的垫圈、密封衬垫、缓冲衬垫，以及供制造其它零件之用；夹布橡胶平板由于增加了夹布，多用于需要防止过渡伸长和压力要求较高的场合。花纹胶板则专供减振、铺地、衬垫等用。工业用橡胶板的规格尺寸、物理机械性能见表 3.2.3-9、表 3.2.3-10。

表 3.2.3-9

工业用橡胶板的规格尺寸及理论质量

厚度	公称尺寸	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	30	40	50
(mm)	公差带	±0.15	±0.2	+0.3 −0.2	+0.4 −0.3	+0.5 −0.4	+0.6 −0.4	+0.7 −0.5	+0.7 −0.5	+0.9 −0.5	+1.0 −0.5	+1.0 −0.5	+1.2 −0.5	+1.2 −0.5	+1.5 −0.5	+1.5 −0.5	+1.5 −1.0	+1.5 −1.0	+1.5 −1.0	+2.0 −1.0	+2.0 −1.0	+2.0 −1.0
宽度(mm)		(500～1000)±2%																				
单位面积质量(kg/m²)		0.75	1.5	2.25	3.0	3.75	4.5	6.0	7.5	9.0	12	15	18	21	24	27	30	33	37.5	45	60	75

注：长度由订货方提出，经制造方同意制造。

表 3.2.3-10

工业用橡胶板的物理、机械性能

橡胶板类型		牌号	扯断力① (MPa) 不小于	扯断伸长率 (%) 不小于	永久变形 (%) 不大于	硬度 (邵尔A)	老化系数 (70℃×72 h) 不小于	变压器油重量变化 (70℃×24 h) (%) 不大于	汽油+苯 (汽油75分苯25分)重量变化(%) (20～30℃×24 h) 不大于	耐酸系数 (20% H_2SO_4或 HCl) (20～30℃×24 h) 不大于	耐碱系数 (20% NaOH 或 KOH) (20～30℃×24 h) 不大于
普通橡胶板	一组	1120	3	250	35	60～75	0.65	—	—	—	—
		1125	5	280	35	60～75	0.65				
		1130	6	300	35	60～75	0.70				
		1140	8	350	35	55～70	0.75				
	二组	1250	13	400	30	50～65	0.80	—	—	—	—
		1260	15	500	30	45～60	0.80				
耐酸碱橡胶板		2030	7	300	35	60～75	0.75	—	—	0.8	0.8
		2040	9	350	35	55～70	0.75			0.8	0.8
耐油橡胶板		3001	7	250	25	60～75	0.75	+8	+20	—	—
		3002	9	250	25	60～75	0.75	+20	+35		
耐热橡胶板		4001	8	300	35	65～75	0.60①	—	—	—	—
		4002	10	350	35	55～70	0.60②				

① 100℃×48 h老化后的老化系数。

② 普通胶板、耐酸碱胶板使用丁苯橡胶超过50%时，其扯断强力允许调整到原指标的80%。

密封橡胶制品的类型、结构、规格尺寸见表 3.2.3-11。

表 3.2.3-11　密封橡胶制品的类型、结构、规格尺寸、采用胶料和应用范围

类　型	结构及规格尺寸	采用胶料		应用范围
		组　别①	技术条件	
O形橡胶密封圈	按HG 4-333-66	Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ组	按HG 4-329-66	适用于安装在各种机械设备上，在规定的温度、压力以及不同的液体或气体介质中，于固定或运动状态下起密封作用
L形橡胶密封圈	按HG 4-331-66	Ⅰ、Ⅱ、组	按HG 4-329-66	适用于装在气压或液压机械设备中，于规定温度和工作压力不大于1 MPa条件下起密封作用
J形橡胶密封圈	按HG 4-332-66	Ⅰ、Ⅱ组	按HG 4-329-66	
U形橡胶密封圈	按HG 4-334-66	Ⅰ、Ⅱ组	按HG 4-329-66	和L形、J形橡胶密封圈同
Y形橡胶密封圈	按HG 4-335-66	Ⅰ、Ⅱ组	按HG 4-329-66	适于装在各种机械设备中，在温度为−30～+80℃，压力为20 MPa下，于不同的液体、气体介质中起密封作用
V形夹织物橡胶密封圈	按HG 4-337-66	Ⅰ、Ⅱ组	按HG 4-329-66	由多层涂胶织物压制而成，用于压力≤50 MPa的液压设备上，在规定的温度范围和液压介质中起密封作用
U形夹织物橡胶密封圈	按HG 4-336-66	Ⅰ组	按HG 4-329-66	
骨架式橡胶油封	按HG 4-692-67	耐油胶料	按HG 4-692-67	适用于对旋转轴起油封作用
J形无骨架橡胶油封	按HG 4-338-66	Ⅰ组	按HG 4-329-66	由J形橡胶油封体和环状自紧弹簧构成，用来防止轴承及其它机械漏油
U形无骨架橡胶油封	按HG 4-339-66	Ⅰ组	按HG 4-329-66	同上，但系U形橡胶油封体
筒式减震器橡胶油封	按HG 4-546-67	耐油胶料	按HG 4-546-67	适用于汽车筒式减震器连杆油封，它的作用是确保连杆往复运动时，减震器油液不渗漏
制动皮膜	按HG 4-544-67	—	按HG 4-544-67	由两面橡胶中间夹织物模压制成，用在气制动系统中，起传递压力的作用
制动皮碗和皮圈	按HG 4-545-67	—	按HG 4-545-67	适用于液压制动系统中，起传递压力和密封作用
水泵水封	按HG 4-547-67	—	按HG 4-547-67	适用于水泵轴水封，装于水泵叶轮轮壳内，起封严作用，防止水流入水泵轴轴承一端，避免轴承生锈
矩形橡胶垫圈	按HG 4-330-66	Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ组	按HG 4-329-66	适用于装在各种机械设备中，在规定的温度范围内，于各种介质中工作，起减震、缓冲和密封作用

①　Ⅰ组为耐油橡胶；Ⅱ组为普通橡胶；Ⅲ组为耐热橡胶；Ⅳ组为耐酸碱橡胶。

7　常用橡胶管的规格

1)输水胶管，又称输水管，夹布胶管、橡胶管。用以输送常温下的水、以及浓度不大于20%的无机酸、碱溶液。其规格见表 3.2.3-12。

表 3.2.3-12 输水胶管的规格

内径尺寸 (mm)	夹布层数 (层)	胶层厚度 (mm)		工作压力 (MPa)
		内胶层	外胶层	
13	3	1.2	1.0	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5
16	3	1.2	1.0	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5
19	3~4	1.2	1.2	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5
25	3~5	1.6	1.2	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5
32	3~5	1.6	1.2	0.5,1.0,1.5,2.0
38	4~5	1.6	1.2	0.5,1.0,1.5
51	4~6	1.6	1.2	0.5,1.0,1.5
64	4~7	1.6	1.2	0.5,1.0
76	4~8	1.6	1.2	0.5,1.0
89	4~9	1.6	1.2	0.5
102	4~9	2.0	1.5	0.35
127	4~10	2.0	1.5	0.35
152	6~10	2.0	1.5	0.35

2)气压胶管，又称气压管、气管、风管、空气管。用以输送压力在 0.5~1.5 MPa以内的各种气体，如空气，二氧化碳、氮气或其它惰性气体。其规格见表 3.2.3-13。

表 3.2.3-13 气压胶管的规格

内径尺寸 (mm)	夹布层数 (层)	胶层厚度 (mm)		工作压力 (MPa)
		内胶层	外胶层	
13	3~6	2.0	1.0	0.5,1.0,1.5
16	3~7	2.0	1.2	0.5,1.0
19	3~8	2.0	1.2	0.5,1.0
25	4~8	2.3	1.5	0.5,1.0
32	4~8	2.3	1.5	0.5,1.0
38	5~9	2.5	1.5	0.5,1.0
51	6~10	2.5	1.5	0.5,1.0
64	6~12	2.5	1.5	0.5,0.8
76	7~12	2.5	1.5	0.5,0.8

3)气焊胶管，又称氧气胶管—氧气管、气焊及气割金属胶管；乙炔胶管—乙炔管、电石管、气焊及气割金属胶管。用以输送氧气及乙炔气，供气焊及气割金属之用；也可用于输送空气。其规格见表 3.2.3-14。

表 3.2.3-14 气焊胶管的规格

内径尺寸 (mm)	编织层数(层)		胶管厚度(mm)		工作压力 (MPa)
	氧气	乙炔	内胶层	外胶层	
6.5	1~2	1	1.8	1	0.5,1.0,1.5
8	1~2	1	1.8	1	0.5,1.0,1.5
9.5	2	1	2.0	1	0.5,1.0,1.5

4)喷雾胶管，又称喷雾管。专用于喷雾器上。其规格见表 3.2.3-15

表 3.2.3-15　　喷雾胶管的规格

内径尺寸 (mm)	编织物层 (层)	胶层厚度 (mm)		工作压力 (MPa)
		内胶层	外胶层	
6.5	1	1.8	1	0.5,1.0,1.5
8	1	1.8	1	0.5,1.0,1.5
9.5	1	2.0	1	0.5,1.0,1.5

5)纯胶管，又称橡胶管、橡皮管。用于输送常温和压力要求较低的水或天然气。其规格见表 3.2.3-16。

表 3.2.3-16　　纯胶管的规格

内径尺寸 (mm)	外径尺寸 (mm)	管壁厚度 (mm)	内径尺寸 (mm)	外径尺寸 (mm)	管壁厚度 (mm)
5	8	1.5	19	25	3.0
6.3	9.8	1.75	22	29	3.5
8	12	2.0	2.5	32	3.5
9.5	14	2.25	32	40	4.0
13	17.5	2.25	38	48	5.0
16	21	2.5			

6)蒸汽胶管，又称蒸汽管、耐热管。用于输送温度在 150℃ 以内的液体和气体，如高温热水和蒸汽。其规格见表 3.2.3-17

表 3.2.3-17　　蒸汽胶管的规格

内径尺寸 (mm)	夹布层数 (层)	胶层厚度 (mm)		热水压力 (MPa)
		内胶层	外胶层	
13	3～4	2.5	1.0	0.8
16	3～4	2.5	1.0	0.8
19	3～5	2.5	1.2	0.8
22	3～5	2.5	1.2	0.8
25	3～6	2.5	1.2	0.8
32	3～7	2.5	1.5	0.8
38	4～8	2.8	1.5	0.8
45	5～9	2.8	1.5	0.8
51	5～12	2.8	1.5	0.8
64	5～12	3.0	1.5	0.8
76	5～12	3.0	1.5	0.8

7)吸引胶管，又称进水管、橡进水。用于在真空作用下吸引常温水和浓度不大于 20% 的无机酸、碱溶液。其规格见表 3.2.3-18。

表 3.2.3-18　　吸引胶管的规格

内径尺寸 (mm)	夹布层数 (层)	接头长度 (mm)	内径尺寸 (mm)	夹布层数 (层)	接头长度 (mm)
25	3	75	127	4～6	125
32	3	75	152	4～6	130
38	3	75	203	4～6	200
51	3～4	100	254	5～7	200
64	3～4	100	305	5～7	250
76	3～4	100	357	5～7	250
89	3～4	100	406	5～7	300
102	3～4	100			

8 橡胶的维护和保养

1)根据使用特点，选用合适的橡胶。

2)不使用时，尽可能使橡胶件处于松驰状态，不受拉、压，避免外力集中在一点上。

3)在运输和贮存过程中，避免雨淋日晒，保持干燥清洁，不要与酸、碱、汽油、油脂及有机溶剂等物质接触。

4)在存放或使用时，要求距离热源 1 m以外；库放温度应保持在 5～35℃之间；相对湿度保持在 50%～80%之间。

5)橡胶件如断裂，可用室温硫化胶浆胶接。

第4章　石　棉

石棉是一种天然矿物纤维，它的特点是质地柔软而有弹性，且有一定的机械强度，能耐高温、不燃烧，导电及导热性很低，有一定的耐酸、耐碱性能，防潮、防霉，防老化性能都很好，此外还具有优良的吸收树脂的能力。因此，可作为绝热、保温、防火、隔声和电气绝缘材料；也可与橡胶、树脂、沥青、水泥以及其它纤维混合，组成兼有各种特性的复合材料。

石棉按其矿床类型和化学成分的不同，可分为以下两大类：

1）蛇纹石类　属于这一类的有温石棉。

2）角闪石类　属于这一类的有青石棉、铁石棉、角闪石棉、透闪石棉和阳起石石棉。这类石棉由于纤维脆性大，工业价值不大。

工业上主要是采用温石棉，有时也用青石棉。

1　石棉制品的分类及其应用范围

石棉制品的分类及其应用范围见表3.2.4-1。

表3.2.4-1　　石棉制品的分类及其应用范围

分类名称			采用的石棉	应用范围
石棉纺织品	石棉纱		温石棉	保温绝热材料以及用于复制各种石棉制品
	石棉线及石棉铜丝线		温石棉	
	石棉绳(方绳及圆绳)		温石棉	保温绝热材料、热塞材料
	油浸石墨石棉绳		温石棉	蒸汽发动机热塞防泄材料
	黑铅粉石棉绳		温石棉	
	石棉松绳		温石棉	保温绝热材料
	石棉盘根	炉门圈盘根	温石棉	保温绝热衬垫材料
		平盘盘根	温石棉	
		弹簧盘根	温石棉	
		橡芯盘根	温石棉	蒸汽发动机热塞防泄材料
		铝芯盘根	温石棉	
		铜丝芯盘根	温石棉	
	石棉布	普通石棉布	温石棉	热绝缘材料、复制品材料
		铜丝石棉布	温石棉	制造刹车带、离合器面片等用
		电解槽石棉布	温石棉	电解槽用
		青石棉布	温石棉	用作过滤材料
	石棉带		温石棉	电工绝缘材料、绝热材料
	石棉绒		温石棉	用作隔热、衬垫及石棉塑料制品等
	石棉衣及石棉手套		温石棉	高温作业
	石棉被		温石棉	保温绝热材料
	石棉防火幕、灭火毯		温石棉	防火用

续上表

分类名称		采用的石棉	应用范围
石棉纸板	石棉纸	温石棉	保温绝热、隔电材料，过滤材料
	石棉瓦楞纸	温石棉	保温材料(适于长期震动导管上)
	石棉板	温石棉	保温绝热、隔音、绝缘材料
石棉橡胶制品 石棉塑料制品	制动衬带	温石棉	制动材料
	离合器面片	温石棉	传动材料
	普通橡胶石棉板	温石棉	高温密封衬垫材料，俗称红纸板
	耐油橡胶石棉板	温石棉	高温高压、耐油的密封衬垫材料，俗称黑纸板或黑鸡毛纸
石棉水泥制品	石棉水泥板	温石棉	电工材料
	石棉水泥防弧罩	温石棉	电工材料
石棉保温制品	硅藻土石棉粉(灰)	温石棉	保温绝热材料，用于包裹锅炉，蒸汽管以及一切有热能散发的机器
	碳酸镁石棉粉(灰)	温石棉	
	重质石棉粉(灰)	温石棉	
	石棉砖	温石棉	锅炉外壁
	石棉管	温石棉	蒸汽管道保温包裹用
	石棉水泥	温石棉	保温绝热材料

2　石棉制品的主要质量指标

石棉制品的主要质量指标见表 3.2.4-2。

表 3.2.4-2　　石棉制品的主要质量指标

质量指标	单位	含意
密度	g/cm^3	衡量石棉制品组织紧密的程度
单位面积质量	kg/m^2	在给定厚度下，衡量石棉纸、板、带制品的组织紧密程度
拉力强度	MPa	衡量石棉制品的强度
自断长度	m	指石棉纸制品在悬挂时受自身重量的作用而断裂时的长度，表示材料的相对强度
经纬纱密度或根数		以一定长度或宽度内的经纱和纬纱根数来度量，密度大则强度高
灼热减量(烧失量)	%	将石棉纤维在 700～800℃ 的马弗炉中烧灼 1～2 h，称量损失的质量，以损失量的百分率表示
水分含量	%	限制在 3%～4%以内
含铁量	%	< 4%，以保证其绝缘性

3　常用石棉制品的规格

1)石棉线，又称纸柏线，用作各种热设备及热传导系统的紧塞、密封、热绝缘材料，也

用来复制其它各种石棉制品。其规格用石棉线的直径(mm)表示，计有：1.5，2，3，5，6，8，10，13，16，19，22，25。

2)石棉绳，按断面形状可分为石棉圆绳、石棉方绳和石棉松绳3种，均用作各种热设备或热传导系统中的填料或热绝缘材料。其规格见表3.2.4-3

表3.2.4-3 石棉绳的规格

直径或对边长度 (mm)	圆绳及方绳	3，5，6，8，10，13，16，19，25，32，38，45，50
	松绳	13，16，19，22，25，28，32，38，45，50

3)石棉板，又称白纸柏、纸柏板、鸡毛纸、衬垫石棉板，用作绝热、保温、隔声及一般电器绝缘材料。其规格见表3.2.4-4。

表3.2.4-4 石棉板的规格

厚度 (mm)	宽度×长度 (mm)
1，1.5，2，2.5，3，4，5，6，8，10，12，14，16，18，20	500×900 1000×1000

4)石棉橡胶板，又称红纸柏、灰纸柏、黑纸柏、油纸柏。高压石棉橡胶板用作介质为高温高压的水、蒸汽、空气、煤气及其它惰性气体或常温常压的汽油、煤油、润滑油及酒精等设备的金属接头和连接密封面的密封衬垫；中压石棉橡胶板用作介质为水、蒸汽的管道结合处的密封衬垫；低压石棉橡胶板仅用作一般水暖设备及低压水管、蒸汽管道接合处的密封衬垫；耐油石棉橡胶板专用作介质为煤油，汽油和润滑油的发动机、管道接头的密封衬垫。其规格见表3.2.4-5。

表3.2.4-5 石棉橡胶板的规格

种类	尺寸 (mm)		密封性能		
	厚度	宽度×长度*	介质	温度(℃)	试验压力(MPa)
高压石棉橡胶板	0.5，0.6，0.8，1，1.2，1.5，2，2.5，3，4	500×500 600×600 1000×1000 1250×1250	蒸汽 汽油 煤气 酒精	450 15～25	10 15
中压石棉橡胶板	1，1.5，2，2.5，3，3.5，4，4.5，5，5.5，6	500×500 600×600 1000×1000 600×1200 1250×1250	水、蒸汽	375	4
低压石棉橡胶板	1，1.5，2，2.5，3，3.5，4，4.5，5，5.5，6	500×500 600×600 1000×1000 600×1200 1250×1250	—	—	—
耐油石棉橡胶板	0.4，0.5，0.6，0.8，1，1.2，1.5，2，2.5，3	550×550 550×1100 1100×1100	煤油 润滑油	15～30	15

5)油浸石棉盘根，适用于介质为蒸汽、空气、水、重质石油产品的机械的旋转轴、往复

表 3.2.4-6 油浸石棉盘根的规格

牌号	形状	直径或方形边长(mm)	密　度(g/cm³)	适用极限压力(MPa)	适用极限温度(℃)	适用介质
YS 450	F	3～50	≥0.9（夹铜丝1.1）	6	450	蒸汽、空气、工业水、重质石油产品
	Y	5～50				
	N	3～25				
YS 350	与YS 450 型相同			4.5	350	
YS 250	与YS 450 型相同			4.5	250	

注：①形状F——方的，实心或1至多层编结；Y——圆的，中间为——扭制芯子，外边是1至多层编结；N——扭制的。

②如石棉线中夹有铜丝时，则在规格后面加注带括号的T字。

③尺寸系列(mm)：3，4，5，6，8，10，13，16，19，22，25，28，32，35，38，42，45，50。

活塞和阀杆上作密封材料。其规格见表 3.2.4-6。

6)橡胶石棉盘根，用于蒸汽机、往复泵的活塞和阀杆上作密封材料。其规格见表 3.2.4-7。

表 3.2.4-7 橡胶石棉盘根的规格

牌　号	方形断面边长(mm)	密度(g/cm³)	适用极限压力(MPa)	适用极限温度(℃)
XS 450	3，4，5，6，8，10，13，16，19，22，25，28，32，35，38，45，45，50	≥1.1	6	450
XS 350			4.5	350
XS 250			4.5	250

注：①盘根可以浸渍润滑剂，夹橡胶条、橡胶芯或金属丝。②盘根通常卷成螺旋状(内径不小于方式边长的4倍)或圆盘形，每根长为3.5～4 m。

7)石棉粉，又称石棉泥。用作各种管道、锅炉以及工业设备表面的热绝缘之用。其规格见表 3.2.4-8。

表 3.2.4-8 石 棉 粉 的 规 格

种　　类	碳酸镁石棉粉	硅藻土石棉粉	一级石棉粉	二级石棉粉
组成成分	碳酸镁钙80%；2～5 mm长的石棉17%；5～20 mm长的石棉3%	硅藻土粉85%；2～5 mm长的石棉14%；5～20 mm长的石棉1%	轻质耐火土及镁钙类细粉85%；2～5 mm长的石棉15%	各种耐火土及镁钙类细粉90%；2～5 mm长的石棉10%
密度(g/cm³)　≤	0.14	0.45	0.6	0.86
耐热度(℃)　≥	450	750	600	600
水分(%)　≤	5	7	5	5
导热率[W/(m·k)]　≤	0.046	0.070	0.080	0.090

第5章 耐火材料

耐火材料指在高温条件下不易熔化且具有适当的机械强度，对接触的固体、液体及气体具有抵抗能力而不受侵蚀，在温度的骤变下不会发生破坏即热震性好，耐火度不低于1580℃的无机非金属固体材料。主要用于金属冶炼、金属铸造、锅炉及高温机械零件等方面。

1 耐火材料的分类、特点和用途

耐火材料一般可分为普通、轻质、不燃和特种耐火材料等四大类

1.1 普通耐火材料

普通耐火材料的特点及用途见表3.2.5-1。

表3.2.5-1 普通耐火材料的特点及用途

名称	主要成分	主要特点	常用温度(℃)	应用举例
粘土砖	Al_2O_3 30~48	热震稳定性好，属弱酸性	小于1350	锅炉、加热炉
高铝砖	Al_2O_3 48~75	热震稳定性好，抗渣性好，属中性	1400~1650	冶金炉
半硅砖	Al_2O_3 15~30 SiO_2不小于65	高温体积稳定、抗酸性渣的侵蚀性好	小于1250	冶金炉
硅砖	SiO_2大于等于93	荷重软化温度高，线膨胀系数较大高温下绝热性较差	小于1500	冶金炉
镁砖	MgO不小于87	耐火度高，抗碱性渣强，绝热性热震稳定性及抗水性差属碱性	1600以上	冶金炉
镁铝砖	MgO不小于80 Al_2O_3 5~10	与镁砖相似，但热震稳定性比镁砖好	1600以上	冶金炉
镁铬砖	MgO不小于60 Cr_2O_3不小于8	与镁硅相似，但热震稳定性比镁硅好	1600以上	冶金炉
镁硅砖	MgO大于80 SiO_2 5-11	荷重软化温度比镁砖高，但热震稳定性差		冶金炉

1.2 轻质耐火材料的特点和用途

轻质耐火材料的特点及用途见表3.2.5-2。

表3.2.5-2 轻质耐火材料的特点及用途

名称	主要成分	主要特点	常用温度(℃)	用途举例
轻质硅藻土砖	SiO_2 60左右	导热率为0.0846~0.4564 W/(m·K)，密度0.6~0.8 g/cm³	小于900	保温隔热层
轻质粘土砖	$Al_2O_3$35~45	导热率为0.221~0.384 W/(m·K)密度0.4~1.3 g/cm³，线胀系数小	小于1200	无熔融物料及侵蚀性气体作用的热工设备内衬及隔热层

续上表

名　　称	主　要　成　分	主　要　特　点	常用温度(℃)	用　途　举　例
轻质高铝砖	$Al_2O_3>48$	与轻质粘土砖相似，其耐火度及耐压强度较高	小于1300	无熔融物料及侵蚀性气体作用的热工设备内衬及隔热层
轻质硅砖	$SiO_2 \not< 91$	耐火度及荷重软化温度较高，导热率0.2558~0.4885 W/(m·K)，密度1.2 g/cm³	小于1400	无熔融物料及侵蚀性气体作用的工业炉砌体
氧化铝泡沫砖	$Al_2O_3 \not< 90$	导热系数小，密度小于0.42 g/cm³	小于1500	热工设备及高温炉中的隔热层
氧化铝空心球制品	$Al_2O_3 \not< 95$	导热系数小，能抵抗强还原性气氛的作用	小于1650	还原气氛强的工业炉内衬，也可用作高温炉隔热层
硅酸铝质耐火纤维和制品	$Al_2O_3 \geq 42$	导热系数小，密度小，化学稳定性较好(磷酸、氢氟酸和强碱除外)，纤维柔软，有弹性	小于1100	要求保温较好的隔热层

1.3　不燃耐火材料

多用于冶金炉、热处理加热炉。

1.4　特种耐火材料

特种耐火材料的特点及用途见表3.2.5-3。

表3.2.5-3　**特种耐火材料的特点及用途**

名　　称	主　要　成　分(%)	主　要　特　点	用　途　举　例
氧化铝	$Al_2O_3>98$	机械强度高，硬度大，耐高温、耐磨、耐腐蚀性和电绝缘性良好，能在氧化和还原气氛下使用	各种高温燃烧器零件，热电偶保护管等
氧化镁	$MgO>98.5$	耐高温，对金属及熔渣有较强耐侵蚀性，但热震稳定性差	用于真空条件下耐高温元件
氧化锆	$ZrO_2+CaO>99$	耐高温，在氧化及还原气氛下有较好热震稳定性及耐侵蚀性，高温下能导电	可作磁流体发电机组的高温电极，1800℃以上发热元件
氧化钙	$CaO>99$	抗金属侵蚀性优良，但抗水化性差	高纯度难熔金属的坩埚
氧化铍	$BeO>99$	导热性良好，热震稳定性优良，质量轻，有毒性	用于真空条件下耐高温元件可用至2000℃
氮化硅	Si_3N_4 99	抗金属侵蚀性和耐化学腐蚀性都很好，电性能优良，可车、刨、铣、钻	热电偶套管
氮化铝	$AlN>99$	耐磨性及抗渣性良好	高温保护管
硼化锆	$ZrB_2>99$	熔点高，不易挥发，硬度高，热震稳定性良好	热电偶测温套管
石英陶瓷	$SiO_2>99$	线胀系数小，热震稳定性优良，导热系数低	耐酸容器的内衬材料

2　使用耐火材料时应注意的问题

1)防潮　耐火制品吸水后均会降低性能，在以后加热时，水分膨胀将引起开裂和剥落，钙质、镁质制品还会发生水化作用以至自然粉碎。所以耐火制品(水泥结合的不烧制品除外)必须存放在仓库内且采取防潮措施。

2)膨胀缝　耐火制品受热膨胀，冷却时收缩，随着温度变化而发生体积的膨胀与收缩。因此砌体中应预先留出膨胀缝。

3)火泥　耐火制品砌筑时，分干砌与湿砌。湿砌用火泥填充缝隙。选用火泥时要与耐火制品的化学性质一致，最好是同一类型的，如粘土砖用粘土火泥，高铝砖用高铝质火泥，以避免化学侵蚀和剥落。

4)烘烤　各种热工设备在投产前须根据耐火制品的特性进行烘烤，以免耐火砌体在加热时水分急骤排出，晶型迅速转化或重烧胀缩过剧而引起损坏。不烧耐火制品尤须注意，应按一定的升温制度进行严格的烘烤。

第 6 章　隔 热 材 料

一般所指的隔热材料有保冷、保暖的隔热材料、高温隔热材料、特种隔热材料以及耐火涂料、隔热墙等建筑材料。其适用温度范围相当宽广，从－250～1500℃而且品种繁多。

1　保温材料

也称隔热材料，包括保温、保冷两个含意。两者不同之点主要在于使用温度的高低，此外保冷材料应具备高抗透湿能力。一般应用的材料有以下数种。

1)硅酸钙保温材料

将硅藻土、硝石灰及充分梳开的石棉与大量的水混合，边搅拌边加热到不大于 100℃时，就能产生含水硅酸钙的细晶体，形成凝胶状混合物。把此凝胶体挤压成形，成形后自模型中取出即获得半成品，将其放入高压锅炉中用 0.78 MPa左右的水蒸汽使硅酸钙晶体进一步长大，由于晶体的自硬作用而增加了强度。从高压蒸锅中取出干燥后，就制成为重量轻、有一定强度、导热率低的硅酸钙保温材料。价格便宜，是现在用得最多的一种保温材料。近来为了代替石棉用有机纤维及人造无机纤维（耐碱纤维）等生产出完全不含石棉的制品。

2)珍珠岩保温材料

一般使用的珍珠岩保温材料是在严格挑选的珍珠岩颗粒中均匀混合石棉或人造无机纤维（玻璃纤维）等，再加入硅酸钠等粘结剂，经压制成板或圆筒状。最高使用温度为 650℃。但应注意珍珠岩颗粒的优劣、粘结剂及加压成形条件等是影响质量的重要因素。

3)石棉保温材料

（1）石棉成型保温材料　它是以石棉及耐热性粘结剂作原料挤压成板状或圆筒状的制品。可耐 600～650℃。根据粘结剂及密度的不同有硬质及软质海棉状两种制品。

硬质制品如石棉保温板、石棉保温筒。可用高密度的（300 kg/m^3）石棉保温筒代替耐火砖作为烟囱的衬里材料，由于质轻施工简便可节约经费。

软质石棉保温材料分为毯状石棉及海棉状石棉，比硬质石棉密度低（10～50 kg/m^3），具有同胶粘剂等即可简易施工和任意变形的优点。毯状制品除具有绝热性外还有良好的保水性及吸音性，可用作建筑物室内天花板、墙壁的隔音内衬材料以及浴池、车船候车室等建筑的天花板、墙壁的保温、防止滴水等特殊用途。海棉状石棉仅由石棉构成，不含胶粘剂，故耐热性优良，若配以适当的物质还可提高其绝热性能、且在超低温下仍能保持弹性。

（2）喷涂石棉保温材料　在精梳的青石棉或铁石棉中配以水合性胶粘剂，用压缩空气从管子中连续喷出，同水一起喷在施工表面，构成无缝的整体保温层。吹喷后立即用泥刀压实以提高其密度。此种材料的特点是可在现场施工，除用作保温材料外广泛用于车辆外壳板的内侧绝热、隔声以及钢筋耐火材料的包覆绝热等。

4)矿渣棉及玻璃棉保温材料

矿渣棉是一种人造无机纤维，直径为 3～10 μm，长度为几毫米到几十毫米，能耐 700～900℃左右的高温。

玻璃棉比矿渣棉细，耐热性约 500℃左右。

5)聚氨脂泡沫

工业上主要使用由氟利昂发泡的硬聚氨脂，其导热率在各类保温材料中最低。可制成型材或将配好的原料直接喷在施工表面上现场发泡。能以预制方式制造绝热输送管，是近年来发展的液化天然气输送及贮藏中不可缺少的保冷材料。还可加入抗燃剂制成难燃性泡沫。

6）泡沫聚苯乙烯

聚苯乙烯薄膜透水性小，但是密度低的泡沫由于珠状熔粘物在其珠子之间存在很多连续气孔，透水透湿阻力极小，导热率也高。一般用作保温、保冷材料的制品。其密度在 30 kg/m^3 以上，若配以抗燃剂可制成自熄火性制品。泡沫聚苯乙烯的缺点是不耐化学药品特别是在石油系溶剂中更差。因此，使用胶粘剂时，必须选用乳胶型物质。

7）其它泡沫塑料

目前主要用作保冷材料的泡沫塑料制品有：聚氯乙烯、酚醛树脂、尿素树脂、硬橡胶、聚苯乙烯、环氧树脂等。

主要保冷材料的性能见表 3.2.6-1。

表 3.2.6-1　　**各种保冷材料的性能比较**

	硬（质）尿烷泡沫	泡沫聚苯乙烯（珠（泡）状发泡）	泡沫聚苯乙烯（挤压成形）	酚醛泡沫	（聚）氯乙烯泡沫	尿素树脂泡沫	硬（质）泡沫橡胶	碳化软木
密度 (kg/m^3)	30～35	25～35	30	30～40	30～70	8～10	80	160
抗压强度 (MPa)	0.15	0.10	0.25	0.18	0.15	0-0.03	0.28	0.30
抗弯强度 (MPa)	0.40	0.28	0.50	0.30	0.6	—	0.45	0.40
抗拉强度 (MPa)	0.25	0.25	0.50	0.25	—	—	0.28	—
吸水率 (体积%)	1.0 以下	3.0	0.5 以下	4.0	1.0	4.0	1.5	2.0
透湿率 (Perm①)	1.0	3.0	2.0	3.5	2.0	—	3.5	—
燃烧性	自灭碳化	自灭熔融	自灭熔融	自灭熔融	自灭熔融	自灭熔融	自灭熔融	可燃
自粘性	良好	无	无	有	无	无	无	无
耐化学药品性	良好	可溶于溶剂	可溶于溶剂	良好	良好	良好	良好	稍好
独立气泡率 (%)	90～95		95 以上	60				
极限使用温度 (℃)	120	70	70	120	70	100	50	130
发泡剂	氟利昂 11	石油醚	石油醚	氮气	氮气	空气	氮气	
施工方式	整块 现场拼装 复面	整块 复面	整块 复面	整块 复面	整块 复面	现场拼装	整块	整块 复面

① Perm=0.21 g/(m^2 · h, kPa)。

2　高温隔热材料

主要是耐用温度为 1000～1500℃ 介于保温材料与耐火材料之间的一些材料。

1）二氧化硅纤维　可用至 1300℃，是为导弹等军事目的研制的，价格昂贵。

2）硅酸铝纤维

硅酸铝纤维亦称为陶瓷纤维，是一种新型耐火保温材料，可用于锅炉做耐热保温用。其使用特点和应用范围见表 3.2.6-2。

表 3.2.6-2 硅酸铝纤维的使用特点和应用范围

特点	应用范围
使用温度高，长期使用温度达 1300℃，最高使用温度 1500～1600℃，直接接触火焰的地方可用到 1150～1200℃ 导热率低，隔热性能好，常温导热率为 0.5315 W/(m·k)，在同样条件下比用其它保温材料导热率低 30%以上 重量轻，其密度仅为一般保温材料、耐火砖的 1/5～1/20。 化学稳定性好，除磷酸、氢氟酸和强酸外，对大多数化学介质有抗腐蚀性 柔软、有弹性、抗震强度较大 热容量小，约为其它保温砖、耐火砖的 1/3～1/5 隔音好，可作为高温消音材料	隔热材料、防火材料、各种加热炉、高温设备及高温管道的保温材料

硅酸铝纤维的理化性能见表 3.2.6-3～3.2.6-5。

表 3.2.6-3 化学成分 (%)

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	TiO_2
48～56	40～48	0.6～1.3	0.18～1.1	0.1～0.5	0.5～1.0	0.3～1.1

注：北京耐火材料厂数据。

表 3.2.6-4 物理性能

性能名称	指标	
	北京耐火材料厂	上海耐火材料厂
密度(kg/m³)	70～90	制品 130～150
耐火度(℃)	1750～1790	>1790
纤维长度(mm)	20～100	
直径(μm)	2～10	3～5
渣球含量(%)	20～40	
使用温度(℃)	1300	1300

表 3.2.6-5 导热率(北京耐火材料厂产品)

密度(kg/m³)	导热率 w/(m·K)				
	300℃	500℃	700℃	900℃	1200℃
105	0.062	0.081	0.107	0.148	0.238
168	0.055	0.067	0.093	0.121	0.179
210			(600℃) 0.0827	0.872	0.1275

注：上海耐火材料厂，常温导热系数 $\lambda = 0.0531$ W/(m·k)

用硅酸铝纤维加入一定量的粘结剂可做成多种形状制品，如毡、纸、板、圈、绳、坩埚等。硅酸铝纤维还可以和其它材料制成复合材料制品，如：和有机纤维可以制成布、绳等；与塑料可制成各种形状制品；另外可以在硅酸铝纤维中加入耐热钢丝网、玻璃丝或有机纤维以增加制品强度。

3)其它耐火纤维　钛酸钾纤维、碳纤维及金属陶瓷。石墨纤维可耐 3000℃ 的高温。

3　特种隔热材料

1)反射型隔热材料　将辐射反射率大的铝箔或不锈钢箔，按一定间隔以叠层方式放置在受热面的平行方向上，或将带有皱纹的箔进行叠层，再封入金属套内，层内抽成真空，使辐射导热控制在最低限度，称之为超隔热材料。用于要求轻量化的设备、结构上。

2）超细孔隔热材料　使隔热材料的细孔尺寸控制在内部气体分子的平均自由行程以下，就可以减少气体传热。在常压下，空气分子的平均自由行程为10^{-4}m，因此用直径为15～30 μm的原料焙烧获得的氧化钛可制成导热率极低的材料。

3）真空填充隔热层　用降低气体压力来代替缩小气孔尺寸，延长气体分子的平均自由行程也能获得同样的隔热效果。在隔热层内填充辐射穿透率低的珍珠岩粉之后抽真空至6.67 Pa左右，在－80℃时可获得0.0026 W/(m · K)的导热率。

第7章 其它非金属材料

1 陶瓷材料

传统上“陶瓷”是陶器和瓷器的总称，现在陶瓷则被看作是无机非金属材料的简称。按照历史发展可将陶瓷大体分成传统陶瓷和特种陶瓷两大类。传统陶瓷是以粘土、长石和石英等天然矿物为原料制成，主要用作日用陶瓷、建筑陶瓷、卫生陶瓷以及工业上应用的低压和高压电瓷、耐酸陶瓷、过滤陶瓷等。特种陶瓷是以人工化合物，如氧化物、氮化物、碳化物、硅化物和氟化物等为原料制成，主要用于化工、冶金、机械、电子、能源和某些新技术中。

1.1 陶瓷的特性

大多数陶瓷在室温下几乎不产生塑性变形。有些陶瓷材料在高温下可表现出一定的塑性变形能力。陶瓷具有很高的抗压强度和硬度，而抗拉强度和剪切强度则很低。陶瓷一般具有高的熔点(大都在2000℃以上)，极好的化学稳定性，特别是具有很强的抗氧化性能。陶瓷的热容随温度的升高而增加，达到一定温度后与温度无关。气孔率大的陶瓷其热容小。陶瓷的热膨胀系数一般为$10^{-5}\sim10^{-6}$/K，热膨胀系数与温度有关，其变化规律也是随温度的升高而增加，达到一定温度后与温度无关。陶材料的抗热震能力一般较差，常常在受热冲击时破坏。

大多数陶瓷是良好的绝缘体，少数陶瓷具有半导体性质。

此外具有特殊光学性能的陶瓷都是重要的功能材料如固体激光器材料、光导纤维、光储存材料等。

1.2 主要陶瓷的种类和用途

1.2.1 耐酸陶瓷

耐酸陶瓷的种类和用途见表3.2.7-1。

表3.2.7-1　　耐酸陶瓷的种类和用途

种类		主要制品	用途举例	使用条件
天然原料	耐酸陶 耐酸耐温陶	耐酸砖、板	砌筑耐酸池、电解电镀槽、防酸地面、墙壁及台面	耐酸碱，使用温度小于90℃时选用耐酸陶。 耐酸碱同时要求温度急变使用温度小于150℃时，用耐酸耐温陶。 此类陶瓷不耐氢氟酸及氟硅酸
		管道	输送腐蚀性流体和含有固体颗粒的腐蚀性材料	
		塔、塔填料	对腐蚀性气体进行干燥、净化、吸收、冷却、反应和回收废气	
		容器	酸洗槽、电解电镀槽、计量槽	
		过滤器	两相分离或两相结合，渗透、渗析、离子交换	

续上表

种类		主要制品	用途举例	使用条件
天然原料	硬质瓷	阀、旋塞	调节腐蚀性流体的流量	耐酸碱，不耐氢氟酸、氟硅酸。使用温度小于150℃
		泵风机	输送腐蚀性流体	
人工化合物原料	莫来石瓷	同硬质瓷	同硬质瓷，性能较好	要求耐酸碱，最高使用温度大于150℃，又要求耐温度急变和受力较大时使用。随氧化铝含量增高，性能好，但制造困难成本高。氟化钙瓷的耐蚀性超过纯氧化铝瓷20倍以上
	75%氧化铝瓷(含铬)	同硬质瓷	同硬质瓷，性能较好	
	97%氧化铝瓷	同硬质瓷	同硬质瓷，性能优异	
	氟化钙瓷		耐氢氟酸的零件	

1.2.2 过滤陶瓷

过滤陶瓷的种类和用途见表3.2.7-2。

表3.2.7-2　**过滤陶瓷的种类和用途**

种类	适用介质和条件	用途举例
石英质	酸性、中性气体和液体过滤，无温度急变的状态	高压气体过滤、液态氧和干冰分离、污水处理
刚玉质	冷热酸性、中性、碱性气体和液体的过滤，有温度急变状态	热碱液过滤，高温烟气过滤、电解电镀槽液过滤、气功仪表执行机构液体滤清
硅藻土质	酸性、中性气体和液体过滤，无温度急变状态	尘埃分离、细菌过滤、酸性电解质过滤
矾土质	酸性、中性、弱碱性气体和液体过滤，有温度急变状态	汽油、柴油过滤、内燃机废气处理
氧化铝质	冷热酸性、中性、碱性气体和液体过滤，有温度急变状态	油水分离、压缩空气油雾分离、银锌电池隔膜
碳化硅质	冷热酸性、中性、碱性气体和液体过滤，有温度急变状态	二氧化硫热气体过滤、潜水泵呼吸器，气体分析过滤器熔融铝过滤器
素烧陶土质	无腐蚀性气体和液体过滤器，无温度急变状态	

1.2.3 高温、高强度、耐磨、耐腐蚀陶瓷

高温、高强度、耐磨、耐腐蚀陶瓷的种类及用途见表3.2.7-3。

表3.2.7-3　**高温、高强度、耐磨、耐腐蚀陶瓷种类及用途**

种类	熔点(℃)	最高使用温度(℃)	用途
氧化铝(Al_2O_3)	2050	空气 1980 真空 1800 还原气氛 1925	保护套管、陶瓷刀具、轴承、耐磨材料
氧化铍(BeO)	2500	空气 2400 真空 2000 水汽 1200(挥发)	高温电绝缘材料，高导热性电绝缘材料
氧化镁(MgO)	2800	空气 2400 真空 1600 还原气氛 1700～1980	耐火砖
氧化锆(ZrO)	2715	空气 2400 真空 2200 还原气氛 1955～2205	非金属发热体、离子导电体材料、氧量分析器

续上表

种类	熔点(℃)	最高使用温度(℃)	用途
碳化硅 (SiC)		空气 1400～1500 1600(短时) 不活泼气氛 2300 NH_3 <1400	热交换材料，发热原件、磨料炉衬
氮化硼 (BN)	3000 (分解)	空气 1100～1400 (氧化严重) He 3000	耐热润滑剂、脱模剂、高温高压实验用材料
氮化硅 Si_3N_4	1900	空气 1100～1400 中性气氛 1850 还原气氛 1850	热电偶保护管、耐热砖、腐蚀性气体用管子、研磨材料、耐磨材料
硅化钼 ($MoSi_2$)		空气 1700 干H_2 1350 CO 1500 SO_2 1600 He、Ne、Ar 1650	具有金属般的导电性、良好的抗氧化性，用作1700℃的发热元件

2 云母

云母是一种晶体结构的天然矿物，除具有良好的解理性（即能剥成很薄的薄片性能）外，还具有高度的抗电性能和极高的耐热性能，在500℃以下能长期保持透明状态，没有弹性损失和碳化现象。同时，化学稳定性好，机械强度高，收缩率小，不燃，不吸潮而且薄片柔软，富有弹性，所以它是重要的电绝缘材料。广泛用于电子、电机、电讯电器、仪表等以及制作高压锅炉、仪器上的特殊需要的零件。云母粉可用于海船、舰艇专用油漆和某些特殊填料等等。

目前应用于电气工业的云母制品主要有：云母带、云母板、云母箔和云母玻璃器类。各类云母制品的组成成分，特点和应用范围见表3.2.7-4。

表3.2.7-4　　云母制品的分类及其应用范围

类型		组成	特点	应用范围
云母板	塑型云母板	系用胶粘漆粘贴云母片经烘焙压制而成	常温下是固体硬质材料，加热到一定温度后具有可塑性，能塑制成所需形状的制品，在烘焙成型、冷却后不再变形	适于塑制绝缘管、环及其它形状的绝缘零件。含胶量少的塑型云母板，适于温升较高或转速较高的电机作绝缘零件
	柔软云母板	系用胶粘漆粘贴云母片或粉云母纸，单面或双面补强经烘焙或烘焙压制而成	常态时具有高度的柔软性，并可弯曲而不破裂。保持柔软性的持续时间是：出厂90天以上	适于作电机槽绝缘及匝间绝缘
	衬垫云母板	系用胶粘漆粘贴云母片，经烘焙压制而成	为硬质的板状绝缘材料，含胶量多，密度较小，厚度公差大	适于作电机电器中垫圈、垫板及其它绝缘衬垫
	换向器云母板（又称整流子云母板）	系用胶粘漆粘贴云母片或粉云母纸，经烘焙压制、加工而成	具有较高的机械强度。和其它云母板相比，所含胶粘漆最少，为密度高、厚度均匀、质地极为密实的硬质云母板	适于制作直流电机换向器铜片间的绝缘层

续上表

类　　型	组　　成	特　　点	应用范围
云母箔(为厚度小于0.3mm的板状材料)	系用胶粘漆将薄云母片或粉云母纸，粘合在单面补强材料上，经烘焙、或烘焙压制而成	在一定的温度下具有可塑性能塑制成型和便于加工，冷却后能保持加工成型后的固定形状	适于作电机、电器卷烘式绝缘零件，如筒(管)、槽衬和磁极绝缘
云母带	系用胶粘漆将薄云母片或粉云母纸，粘合在单面或双面补强材料上，经烘焙(或不经烘焙)而成的带状云母绝缘物	常态时具有柔软性，并有一定的抗拉强度，在以手工或机械方法包绕到线圈上时，不会断裂	适于作电机线圈绝缘
云母玻璃	系用云母粉与低熔点硼铅玻璃粉混合后，经热熔模压成型的硬质板状材料	耐热性和耐电弧性好，但加工较困难，一般采用高速钢或砂轮刀具进行加工	主要用作高压电器耐弧、耐高温绝缘材料

常用云母制品的品种、型号、特性、用途、规格及主要质量指标可参阅有关标准。

(1)塑型云母板　JB 898-74。
(2)柔软云母板　JB 897-74。
(3)衬垫云母板　JB 900-74。
(4)换向器云母板　JB 899-74。
(5)云母带　JB 896-74。
(6)云母箔　JB 901-74。
　JB 1490-74。
　JB 1491-74。
(7)粉云母板　JB 1481-74。
　JB 1486-74。
　JB 894-74。
(8)粉云母带　JB 1480-74。
　JB 1259-74。
　JB 1479-74。
(9)粉云母箔　JB 1487-74。
　JB 1488-74。
　JB 1489-74。

3　木材

木材是用途广泛、消耗量很大的一种工程材料。其优点是：重量轻，强度较高(比强度大于钢)；易于加工；有很好的弹性，对震动和冲击的抵抗性好；对热、声、电的绝缘性好；可以胶合或用螺钉及嵌接器结合。木材也有如下一些缺点：有吸湿性因而会改变尺寸、形状和性质；容易燃烧、变色、腐朽和虫蛀；具有天然的缺陷和裂纹、节子等。

木材的分类如表 3.2.7-5。

表 3.2.7-5　　木材的分类

分类方法	分类名称	说明
按树种分类	针叶树	树叶细长如针，多为常绿树。材质一般较软，有的含树脂，故又称软材。如：红松、落叶松、马尾松、云杉、冷杉、杉木、柏木等
	阔叶树	树叶宽大，叶脉呈网状，大都为落叶树。材质较坚硬，故称硬材，如樟木、榉木、水曲柳、栎木、色木、山毛榉等。也有少数质地较软的，如桦木、椴木、山杨、青杨等
按材种分类	原条	系指已经除去皮、根、树梢的木料，但未按一定尺寸加工成规定的材类
	原木	系指已经除去皮、根、树梢的木料，并按一定尺寸加工成规定直径和长度的材类。根据使用情况，分为直接使用的和加工用的两种原木
	普通锯材	系指已经加工锯解成材的木料。
	枕木	系指按枕木的断面和长度而锯成的成材

3.1　木材的机械性能和工艺性能指标

木材的机械及工艺性能指标见表 3.2.7-6。

表 3.2.7-6　　木材的机械性能及工艺性能指标

性能		指标	意义
物理性能	含水率	%	木材中水分重量与全干木材重量之比。我国北方约 12%，南方约 18%，长江流域约 15%，有的国家规定标准含水率为 15%
	干缩率（收缩率）	%	木材干燥后尺寸减小值与全干时尺寸的百分比
	湿胀率	%	吸湿后尺寸的增大与全干时的百分比
	密度	g/cm^3	在某一含水率时，单位体积的质量，木材的强度随容重的大、小而增减
	导热率	W/(cm · s · ℃)	木材的导热率很小，几乎与石棉相近；含水率高（容重大）导热系数亦大
机械性能	抗压强度	Pa	顺纹抗压：是木材强度中有代表性的性能 横纹抗压：又分局部受压与全部受压两种，约为顺纹的 10%
	抗拉强度	Pa	顺纹抗拉：约为顺纹抗压强度的 2 ～ 3 倍 横纹抗拉：仅为顺纹的 3％
	抗弯强度	Pa	约为顺纹抗压强度的 1.5～2 倍
	顺纹抗剪	Pa	约为顺纹抗压强度的 20%
	硬度	MPa	端面硬度<40 MPa为软质树种， 端面硬度>80 MPa为硬质树种， 端面硬度在 40～80 MPa之间为软硬适中的树种
	冲击强度	J/cm^3	单位体积受冲击而弯曲折断时所消耗的功。功愈大韧性愈大
工艺性能	抗劈力	N/m	抵抗楔子从端部劈开的能力。反映劈开的难易和钉钉是否牢固
	耐磨性	%	磨损后失重与原重量百分比。含水率大耐磨性降低；硬度大耐磨性高
	握钉力	N	从木材中拔出钉子所需的最大力。一般以含水率 15%时作为比较标准

3.2 木材的选用

木材的选用见表 3.2.7-7。

表 3.2.7-7 **木材的选用**

材种		材质要求	建议选用的树种
一般木质机械		容重、强度和冲击强度大，不劈裂，易加工	硬木松类，落叶松属、铁杉属、柏木、水曲柳、山毛榉、按树属槐树，槭属
船舶用材		木质坚实、强度大、耐水湿、耐腐朽	红松、落叶松属、樟子松、冷杉松、云杉属、杉木属、柏木、侧柏、榉木、柚木、樟木、水曲柳、楠木、梓木、榆木、槐树
包装用材	箱、桶	有适当强度、钉着性较好，变形小	冷杉属、云杉属、铁杉属、松属、柳杉、杉木、杨属，柳属、桦木属、枫杨、榆属、木荷以及其它杂木
	机械设备	强度较大	落叶松属，硬木松属，铁杉属、桦属、榆属、栎属、锥栗属，杜英属，马骑荷、粘木、灰木属

3.3 胶合板

胶合板适合于船舶内部装修及结构材料、贴面板的基板等。

胶合板的分类及幅面尺寸见表 3.2.7-8。

表 3.2.7-8 **胶合板的尺寸**

种类	宽度 (mm)	长度 (mm)						长、宽公差带 (mm)	备注
		915	1220	1525	1830	2135	2440		
阔叶树材胶合板	915	915	—	—	1830	2135	—	$^{+8}_{0}$	①胶合板表面的木材纹理方向，与胶合板长向平行的称为顺纹胶合板，与宽向平行的称为横纹胶合板 ②如经双方协议，幅面尺寸，可不受本规定限制
	1220	—	1220	—	1830	2135	2440		
针叶树材胶合板	1525	—		1525	1830	—	—		

3.4 硬质纤维板的规格和用途

硬质纤维板的规格和用途见表 3.2.7-9。

表 3.2.7-9 **硬质纤维板的规格和用途**

厚度 (mm)		幅面尺寸(长×宽)(mm)		用途
尺寸	公差带	尺寸	公差带	
3 4 5	±5	1220×610 1880×915 1800×900 2440×1220 5490×1220	±5	硬质纤维板系由木材碎料加工制成(也可由竹材和草本植物作原料制成)供船舶内部装修、家具等方面使用

4 纸和纸张

通常把薄而轻的纸叫做纸张，厚而重的纸叫做纸板。常用纸制品的品种及用途见表 3.2.7-10。

表 3.2.7-10　　　　常用纸制品的品种及用途

名　　称	牌号或种类	部　　标	用　　　　途
电缆纸	DLZ TLZ	QB 131—79	<35 kV的电力电缆绝缘用纸 <35 kV的电信电缆绝缘用纸
电话纸	DH	QB 218—80	供多股电讯电缆绝缘用纸
电容器纸	A类 B类	QB 603—81	电子工业用电容器 电力电容器
电绝缘纸板	50/50 100/100	QB 242—76	用于震动绝缘、垫片、部件 薄的用于绝缘保护、厚的供制作垫片、部件
浸渍绝缘纸及卷缠绝缘纸	JZ	QB 1913—80 QB 332—82	供浸渍树脂后，压制多层绝缘板用 涂以粘合物质、制造绝缘卷绕制品
钢纸板	硬钢纸板 软钢纸板	QB 364—81 QB 365—81	用作绝缘材料及机电仪器的部件 制作密封连接处的垫片
钢纸管			供作电器、熔断器、避雷和电机用线路套管
钢纸棒			供制作机械或电气零件
青壳纸			电气工业制作绝缘材料
衬垫纸板	未浸渍的 浸渍的		用于制造法兰连接和其它连接中的密封垫片 柴油机及其它与汽油、润滑油或水发生关系的机器中作密封衬垫
防水纸板	沥青防水纸板 普通防水纸板	QB 219—62	用作防水材料
滤芯纸板	薄滤芯纸板 厚滤芯纸板	QB 135—75	滤清器内滤片 滤清器内滤片的垫架
油纸及油毡纸		QB 326—73 JG 73—64 JG 74—64	用于防水、防潮

5　毛毡

机械制造中所用的毛毡分为：粗毛毡、半粗毛毡和细羊毛毡(又叫航空用毛毡)。又可根据用途不同分为：

(1)油衬毛毡　用以制造油封，保持摩擦处的润滑油和防止水和灰尘侵入。

(2)衬垫毛毡　用作金属表面间衬垫，防止腐蚀、擦伤、减轻冲击和震动。

(3)过滤毛毡　用于滤油器和其他液体用的垫滤物。

毛毡的尺寸规格用长度、宽度和厚度表示，一般长度为 1 ～ 5 m，宽度为 0.9～1.9 m，厚度在 2 ～20 mm范围内，可根据需要进行选用。

毛毡的牌号及主要质量指标见表 3.2.7-11。

表 3.2.7-11　　　　　　毛毡的牌号及主要质量指标(FJ 314—66)

类型	牌号	密度(g/cm^3)	断裂强度(MPa)≥	断裂伸长率(%)≤	游离硫酸含量(%)≤	植物杂质含量(%)≤	矿物杂质含量(%)≤	毛细管作用(厚度<10 mm时)mm≥		
								5 min	10 min	20 min
细羊毛毡	112-44	0.44	5.0	90	0.30	0.35	0.12	—	—	—
	112-41	0.41	4.7	105	0.30	0.35	0.12	—	—	—
	112-39	0.39	4.5	110	0.30	0.40	0.12	—	—	—
	112-36	0.36	3.5	115	0.30	0.40	0.12	—	—	—
	112-32	0.32 ±0.02	2.5	120	0.30	0.40	0.12	—	—	—
	112-30	0.30	—	—	0.15	0.35	0.12	35	40	45
	112-25	0.25	—	—	0.15	0.35	0.12	35	40	45
	112-14	0.14	—	—	—	0.50	—	—	—	—
	112-09	0.09	—	—	—	0.50	—	—	—	—
半粗羊毛毡	122-38	0.38	4.0	95	0.40	0.60	0.15	—	—	—
	122-36	0.36	3.0	—	0.40	—	—	—	—	—
	122-34	0.34	2.5	110	0.40	0.60	0.15	—	—	—
	122-30	0.30 ±0.02	2.5	125	0.40	0.60	0.15	—	—	—
	122-24	0.24	—	—	0.15	0.50	0.15	25	35	45
	222-36	0.36	—	—	0.10	—	—	—	—	—
	222-34	0.34	—	—	0.10			—	—	—

6 皮革

按原料皮的种类而分有：牛革、猪革、山羊革、马革、骆驼革等。此外还有各种分类法，见表 3.2.7-12。

表 3.2.7-12　　　　　　皮革的分类

分类名称		说明
按原料的重量	重革(重皮)	每张皮质量超过 27 kg的，如牡牛皮、大牡牛皮、牝牛皮、水牛皮、马皮等
	轻革(轻皮)	每张皮质量低于 17 kg的，如仔牛皮、小牡牛皮、犊牛皮、羊皮、猪皮等
	中革(中量皮)	每张皮质量在 17～27 kg之间的，如各种中等的牛皮马皮等
按鞣制方法	植物鞣制革	采用植物鞣剂(槲树皮或橡碗子等)鞣制而成的皮革是最常用的一种皮革
	铬鞣革	采用铬盐(如红矾钠)的水溶液作鞣剂鞣制成的皮革，也是一种常用的皮革。
	植一铬结合鞣制革	采用上述两种鞣剂结合鞣制而成的皮革
	其它	合成鞣料革、铁鞣革、铝鞣革、油鞣革……等
按用途	轮带革	供制造机器、传动轮带用
	皮碗及衬垫用革	供制造压力机及其它机器设备中的皮碗、油封和衬垫材料。
	擦试绒面革(麂皮绒面革)	供擦试显微镜或照像机镜头以及其它精密仪器、设备用
	过滤用油鞣革 煤气表用革	供分离油水之用 在煤气表上往复振动，将煤气压出

6.1 皮碗和衬垫用革

皮碗及衬垫用革的种类及主要质量指标见表 3.2.7-13。

表 3.2.7-13　　皮碗及衬垫用革的种类及其质量指标

指　标　名　称		植物鞣革	植一铬结合鞣革	铬鞣革
水分(%)	不大于	16	16	16
油脂含量(%)	不小于	8	8	8
三氧化二铬含量(%)	不小于	—	0.6	3.5
pH值(氧化钾抽出液)	不小于	4	4	4
抗拉强度(MPa)	不小于	25	25	30
伸长率(%)	不大于	17	18	25
革面向外，中间垫以直径为 10 mm 的辊上弯曲 180°时，革面不应有裂纹。皮革必须充分鞣制和均匀上油，革面应当呈本色，色彩均匀一致，干净，纤维细致紧密。革面不许有虻孔、裂纹，厚薄要均匀。革面内应清除干净				

6.2 植鞣黄牛轮带革

植鞣黄牛轮带革的种类及主要质量指标见表 3.2.7-14 和 3.2.7-15。

表 3.2.7-14　　植鞣黄牛轮带革的类别及规格

类别(按标准点厚度分)	1	2	3	4	5	6	7
规格(mm)	>5.5	5.0~5.5	4.5~5.0	4.0~4.5	3.5~4.0	3.0~3.5	2.5~3.0

表 3.2.7-15　　植鞣黄牛轮带革的性能指标及用途

指标	名称	抗拉强度(MPa)	伸长率①(%)	收缩温度(℃)	水分(%)	油脂(%)
	规定	>25	<8	不低于 75	14~18	10~18
用　途		供机器传动轮带用				

① 伸长率为张力 9.8 MPa 时的伸长率。

6.3 皮革传动带

皮革带是由牛或猪的背部皮，用植鞣或铬鞣等法制成。主要用于各类轻型机械设备传动装置中、作传递动力之用。规格及质量要求见表 3.2.7-16。

表 3.2.7-16　　皮革传动带规格及质量要求

规格、指标　类别		单层皮带革				双层皮带革	
尺寸规格	宽度(mm)	25~38	50~64	76~88	100	50~88	100~200
	厚度(mm)	4	4.5	5	5.5	7	9
质量指标	断面的抗拉强度(MPa)	24~27					
	伸长率，每 10 MPa不超过 %	10				10	
	外观	不应有显著的机械损伤、割口、刺孔				不应有显著的机械损伤、割口、刺孔	
	弯曲试验	合格				合格	

7 软木

软木材料为柔软的颗粒状，内部结构均匀无尘埃及杂质。软木板是由颗粒状软木经粘合压制而成。制品不应有裂纹、毛刺、凸起部分、破裂处及凹孔等。其规格、品种、性能及用途如表 3.2.7-17 所示。

表 3.2.7-17　　软木及软木板的规格、品种、性能及用途

品种 性能	软　木			软　木　板	用　　途
	超细	中细	普通（粗糙）	规格(mm)	
抗拉强度(MPa)	>1.50	>0.8	>0.5	厚度及公差带 ≦3　±0.2 3.5～5　±0.4 5.1～10　±0.5 宽度及公差带 305　±15 长度及公差带 914　±25	软木板可制成各种用途的密封件，例如汽油机汽阀室盖用垫片，水道孔盖板用垫片，液压设备上的油封、变压器上用的垫片等
引伸率(%)	>7	>5	>3		
密度(g/cm^3)	<0.48	<0.45	<0.38		
耐沸水(h)	10	5	3		
含水率(%)	机械配件用<10 木塞用　9～15				
柔软性	在比样品厚 15 倍心轴上弯曲不发生裂纹及脱粒现象				

8 玻璃纤维

玻璃纤维(简称玻纤)是非结晶型无机物纤维，单丝直径 5～6 μm、单丝抗拉强度为 1600～3500 MPa，相对密度为 2.16～2.70，不燃烧，线胀系数小，除氢氟酸和热的浓磷酸外，能耐各种介质的腐蚀，其缺点是不耐磨、易受机械损伤。

玻璃纤维的种类、成分及性能与用途如表 3.2.7-18 和表 3.2.7-19 所列。

表 3.2.7-18　　玻璃纤维的种类与成分(质量%)

序号	玻璃种类	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
1	无碱铝代硼硅酸	54	10	14	17.5	4.5	—	—
2	含碱硼硅酸	59	3.5	4.5	16	5.5	11	0.5
3	含碱硼硅酸	65	5.5	4	14	3	8	0.5
4	含碱硼硅酸	59.5	7	5	—	—	14.5	—
5	含碱硅酸	73	—	2	5.5	3.5	16	—

表 3.2.7-19　　玻璃纤维的性能与用途

序号	性　　能	用途(括弧内为纤维的直径 μm)
1	电绝缘性及耐化学性优良	电器、树脂、橡胶、石膏增强用的毡及布(6～16 μm)
2	耐久性良好	隔热吸声用棉(8～15 μm)
3	耐酸性良好	蓄电池用毡(10～15 μm)，滤酸布(6～10 μm)
4	耐久性良好	轻量隔热，吸声用棉(细的 1～5 μm)、高速滤纸用棉(超细 1 μm以下)
5	价格低廉	过滤空气、液体等的填密件(11～25 μm)

玻璃纤维还大量用于增强塑料，称为玻璃纤维增强塑料，是以合成树脂为胶粘剂，以玻

璃纤维及其制品为增强剂复合而成的，也是一种复合材料。

热固性玻璃纤维增强塑料俗称玻璃钢，可制成板材、管材、棒材及各种成形工件。

纤维制品适用的成型工艺及用途见表 3.2.7-20。

表 3.2.7-20　　**纤维制品适用的成型工艺及用途**

纤维制品名称	适用的成型工艺	典型制品中玻璃纤维用量(%)	用途举例
无捻粗纱（连续玻璃纤维合股纱）	纤维缠绕，连续层压，对模模压，喷射，引拔成型等	25～80	管道、氧气瓶、高压容器
短切纤维（合股纱切成 3～6 mm）	预混料模压	15～40	电气零部件
增强毡（连续或短切纤维散铺成的毡）	对模模压，手糊法，离心浇铸	20～45	泵、阀、半透明板
纱（加捻纱线）	纤维缠绕编织成型	60～80	电气层压制品、船舶壳体
织物（玻璃纤维织成的布）	手糊法，真空袋法，热压釜法高压层压成型	45～65	管、板、风机叶片、壳体
无捻粗纱织物（粗纱织成的布、带）	手糊法	40～70	大容器、船舶壳体、发动机罩
无纺织物（单向平行纺织成的布、带）	手糊法，纤维缠绕	60～80	壳体、风机叶片、电机绑扎带

第8章　复合材料

1　复合材料的特点和种类

一般认为，复合材料是由两种或两种以上性质不同的材料用物理或化学方法组合而成的，其结构为多相。其中一相为基体，起粘结作用，另一相起增强作用。与单一材料相比，它具有独特的性能，例如纤维增强复合材料具有如下性能特点：

1）有较高的比强度（强度/密度）和比模量（弹性模量/密度）。一些常用工程材料和复合材料的比强度、比模量数值列于表3.2.8-1中。

表3.2.8-1　**几种常用材料与复合材料强度、刚度的比较**

材料名称	密度 (g/cm³)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	比强度 (N.m/g)	比模量 (KN.m/g)
中碳钢	7.8	1030	210	132	27
铝合金	2.8	470	75	168	27
钛合金	4.5	960	114	213	25
玻璃钢	2.0	1060	40	530	20
碳纤维 II/环氧	1.45	1500	140	1034	96
碳纤维 I/环氧	1.6	1070	240	669	150
有机玻璃 PRD/环氧	1.4	1400	80	1000	57
硼纤维/环氧	2.1	1380	210	627	100
硼纤维/铝	2.65	1000	200	377	75

2）疲劳极限　有较高的疲劳极限，例如碳纤维-聚酯树脂复合材料的疲劳极限是拉伸强度的70%～80%，而金属材料的疲劳强度只有其抗拉强度的40%～50%。

3）减震性能　复合材料的比模量大，故其自振频率高，可避免在工作状态下产生共振及由此引起的早期破坏；此外还具有较好的吸振能力。

4）耐高温性能　各种增强纤维一般在高温下仍可保持高的强度，所以用它们增强的复合材料，其高温强度和弹性模量均较高，特别是金属基复合材料。

此外还可以设计出具有各种特殊性能的复合材料，如隔热性、烧蚀性以及特殊的电、光、磁等性能。

复合材料按性能可分为功能复合材料和结构复合材料两类。目前已大量研究和应用的是结构复合材料。

复合材料按基体可分为非金属基与金属基两类，目前大量研究和使用的是以高聚物为基的复合材料。按增强体的种类和形状可分为颗粒状，层状及纤维增强等复合材料。发展最快，应用最广的是各种纤维增强的复合材料。

表3.2.8-2是目前所采用的复合材料的种类。

表 3.2.8-2　　　　复合材料的种类

增强体　基体		金　属	无机非金属				有机材料		
			陶　瓷	玻　璃	水　泥	炭　素	木　材	塑　料	橡　胶
金　属		金属基复合材料	陶瓷基复合材料	金属网嵌玻璃	钢筋水泥	无	无	金属丝增强塑料	金属丝增强橡胶
无机非金属	陶瓷{纤维 拉料	金属基超硬合金	增强陶瓷	陶瓷增强玻璃	增强水泥	无	无	陶瓷纤维增强塑料	陶瓷纤维增强橡胶
	炭素{纤维 拉料	炭纤维增强金属	增强陶瓷	陶瓷增强玻璃	增强水泥	炭纤维增强碳复合塑料	无	炭纤维增强塑料	炭纤炭黑增强橡胶
	玻璃{纤维 拉料	无	无	无	增强水泥	无	无	玻璃纤维增强塑料	玻璃纤维增强橡胶
有机材料	木　材	无	无	无	水泥木丝板	无	无	纤维板	无
	高聚物纤维	无	无	无	增强水泥	无	塑料合板	高聚物纤维增强塑料	高聚物纤维增强橡胶
	橡胶微粒	无	无	无	无	无	橡胶合板	高聚物合金	高聚物合金

2　具有代表性的复合材料

2.1　玻璃纤维增强塑料

玻璃纤维增强塑料属于塑料型复合材料，也称为玻纤增强塑料，是以树脂为粘结剂，以玻璃纤维及其制品为增强体的复合材料。按树脂的性质分为热固性和热塑性两件。

1)热固性玻纤增强塑料，是以热固性树脂为基体加入玻璃纤维等增强材料制成的，俗称为玻璃钢。可制成管材、板材、棒材及各种成型工种。

2)热塑性玻纤增强塑料，是以热塑性塑料为基体加入玻璃纤维等增强材料制成的在工程上，普遍用作结构材料。

2.1.1　热固性树脂的特点和用途

几种热固性树脂的特点和用途见表 3.2.8-3。

表 3.2.8-3　　　　热固性树脂的特点和用途

名　称	主要特点	用途举例
不饱和聚酯树脂	良好的电绝缘性、耐腐蚀性、韧性和透明性，可在接触压力下常温固化，工艺简便，成型收缩率较大，体积收缩率6%～10%，价格较廉	容器、船艇、贮槽、电气设备
环氧树脂	良好的电绝缘性和粘结性能，较高的机械性能和耐热性能，耐一般酸、碱及有机溶剂，耐霉菌、耐水，成型收缩率小，体积收缩率1～5%，树脂可长期保存，加入某些固化剂，可在接触压力下常温固化	高强度制件、电绝缘件、容器、风扇叶片泵、阀、压力容器

续上表

名 称	主 要 特 点	用 途 举 例
酚醛树脂	优良的耐酸性、尺寸稳定性和耐燃烧性，高温老化性能比聚酯好，能承受较大载荷，电绝缘性好，耐硫化氢、油、水、汽油、苯，成型时有副产物析出，需加热加压，硬脆、贮存期短、价廉	耐腐蚀件、电气零部件、一般结构件泵、阀、轴瓦
硅树脂	优良的电绝缘性、耐高压电弧、热稳定性高、憎水、耐电晕、耐火焰、耐腐蚀、耐臭氧、耐低温，价格较高	高频绝缘件、高级绝缘件、湿热地区电机、电器绝缘件
聚邻苯二甲酸二丙烯酯	优良的电绝缘性，在高温、高湿下性能几乎不变，吸湿性小，尺寸稳定性高，能耐水、油、酸、弱碱和有机溶剂，能在－60～200℃使用，聚间苯二甲酸二丙烯酯可在较高温度长期使用	高温高湿绝缘件、电子计算机零件
呋喃树脂	优异的耐腐蚀性能，除强氧化酸外，能耐许多强酸、碱、盐及有机溶剂，耐热性和电绝缘性能好，质脆，价廉	高温绝缘件

2.1.2 玻璃纤维的特点和用途

几种玻璃纤维的特点和用途见表 3.2.8-4。

表 3.2.8-4　　玻璃纤维的种类、特点和用途

种 类	代 号	主 要 特 点	用 途 举 例
有碱纤维（含碱量＞12%）	A	耐酸性好，耐水性差，易吸潮，电性能差，强度较无碱纤维低 10%～20%，原料丰富，成本低	隔热、保温件
中碱纤维（含碱量 6%～12%）		耐酸性好，电绝缘性差，强度和模量低，原料丰富，成本低	耐腐蚀件，对电性能无要求的制品
无碱纤维（含碱量＜2%）	E	电绝缘性好，抗拉强度 2000 MPa 以上，密度 2.54 g/cm³	电绝缘件
高强度纤维	S	强度高，抗拉强度 3000 MPa 以上，高温保留强度高，疲劳极限高	高强度件
高硅氧纤维		含 $SiO_2$95%以上，耐高温达 1100℃，伸长率 1%	防火、高温设备
空心纤维		质轻，刚性好	航空、海底设备
低介电纤维	D	介电常数低，透波性好，强度较差，密度小，为 2.16 g/cm³	雷达天线罩
化学纤维	C	耐腐蚀性好	耐腐蚀件

玻璃纤维制品有纱、无捻粗纱（玻璃丝束）、玻璃布（平纹、斜纹、缎纹、无捻粗纱布、单向布等）、玻璃带、玻璃毡以及短切纤维和玻璃丝绒球等。

2.1.3 热固性玻璃纤维增强塑料的机械性能

玻璃纤维的含量、成分、排列方向性及其表面处理、树脂的类别和成型工艺等对玻璃增强塑料的性能都有影响。其性能如表 3.2.8-5 所示。

表 3.2.8-5　　　　　　　　　　　**玻璃纤维增强塑料的机械性能**

性　能	聚　　脂		环　　氧		酚　醛	有机硅	聚邻苯二甲酸二丙烯醇
	玻璃布	玻璃毡	无纺连续玻纤	玻璃布	玻璃布	玻璃布	玻璃布
抗拉强度(MPa)	126~455	70~175	770~1500	245~595	63~350	70~260	147~434
弹性模量(MPa)	7000~19600	7000~13000	38500~62300	14000~24500	8400~17500	10000~14000	—
抗压强度(MPa)	140~420	140~315	630~840	245~560	238~525	175~320	175~385
抗压模量(MPa)	21000~28000	10500~17500	37100~59500	—	—	—	—
抗弯强度(MPa)	87~630	105~280	840~1470	280~735	112~560	70~266	210~525
抗弯模量(MPa)	4200~24500	7000~12600	37100~56000	14000~31500	7000~28000	7000~24500	4200~21000
抗剪强度(MPa)	84~160	70~140	—	98~175	120~168	115~140	124~140
成型条件 压力(MPa) 温度(℃)	0~0.84 室温~150	0~3.5 室温~150	0.07~7 120~165	0.07~12.5 室温~190	0.105~14 130~175	0.2~14 160~260	0.07~10.5 95~175

2.1.4　热塑性玻璃纤维增强塑料的机械性能

热塑性玻璃纤维增强塑料的机械性能见表 3.2.8-6。

表 3.2.8-6　　　　　　　　　　　**常用热塑性玻璃纤维增强塑料的性能数据**

名　　称	吸水率(%)	线胀系数(10^{-5}/℃)	热变形温度①(℃)	马丁耐热温度②(℃)	抗拉强度(MPa)	弹性模量(10^3 MPa)	伸长率(%)	抗弯强度(MPa)	冲击强度(无缺口)(J/cm²)	硬　度
聚丙烯(30%)③	0.01~0.05	2.9~5.2	110~150	—	55~77	3.2~6.3	2.0~3.6	49~77	1.5~1.8	90(HRR)
聚氯乙烯(25%)	0.02	1.5	160	—	110	10.2	2~3	154	—	—
聚苯乙烯(20%~35%)	0.05~0.07	3.0~4.5	90~105	—	63~105	7.7~8.5	0.8~1.3	105~134	—	70~95(HRM)
ABS(20%~40%)	0.18~0.40	2.9~3.6	100~115	—	59~133	4.1~7.2	2.5~3.0	112~189	—	65~100(HRM)
聚酰胺(20%~40%)	0.2~2.0	1.2~3.2	160~260	150~185	110~158	7.0~9.3		120~327	5.6~8	—
聚甲醛(20%)	0.25~0.29	3.6~8.1	152	—	59~77	7.0	2.0~7.0	105④	2.2~3.7	75~90(HRM)
聚碳酸脂(30%)	0.23	2~3	135~140	—	125~167	—	6~8	167~188	2.2~3.7	93(HRM)
聚对苯二甲酸乙二醇脂(17%)	—	2.5~3.4	145	—	134	8.3~9.0	5	175	3.7	14.5(HB)
聚苯醚(20%~30%)	0.06	2.2	130~150	185	91	6.5~8.4	4~6	165	2.2	12(HB)
聚砜(30%)	<0.01	5.5	—	170~180	100	3	8.4	180	1.6	10(HB)

注：① 在 1.86 MPa 条件下。
② 马丁耐热温度指塑料试样在规定的载荷下受热变形，达到一定变形值时的温度，用来比较塑料耐热性的高低，而不是允许使用温度上限。
③ 玻璃纤维含量。
④ 5％变形。

2.1.5 选用时应考虑的因素

1)玻璃纤维增强塑料的强度主要决定于玻璃纤维的类别、含量及排列的情况。强度随玻璃纤维含量的增加而提高；纤维呈平行时，沿单丝方向的强度和模量都最高；纤维杂乱铺开时，强度不集中在一二个方向上，而是各方向相等，但较低。

2)耐腐蚀性能和耐热性能随树脂而不同，同一种树脂而配方不同时，一般对性能有影响。

3)根据纤维排列、数量、对树脂种类和质量要求，选用相应的成型工艺。手糊法适用于小批量大部件；模压法生产大批量、高精度零部件；缠绕法生产承受内压或外压的高强度产品。

4)在产品结构设计时，对于强度的安全系数，一般取 3 ～ 9，随使用条件而异，见表 3.2.8-7。如掌握了疲劳、蠕变和应力集中等条件，安全系数可以取 2 以下。

表 3.2.8-7　　使用条件与安全系数

使用条件	安全系数
短时间的静载荷	≥ 2
长时间的静载荷	≥ 4
变动载荷	≥ 4
疲劳或双振动载荷	≥ 6
往复冲击载荷	≥10

2.2 碳纤维树脂复合材料

也称碳纤维增强塑料，是由碳纤维或其织物，如布、带等与热固性树脂或热塑性树脂结合而成。具有比玻璃纤维增强塑料更高的比强度、比模量、且有优良的减磨、耐磨、自润滑、耐腐蚀、导热等性能。用于比强度、比模量要求高的结构件，如压气机叶片、喷气发动机风扇叶片、化工设备中的耐蚀件、轴瓦、齿轮等。

表 3.2.8-8 结出了 2 种碳纤维-环氧复合材料的性能。

表 3.2.8-8　　碳纤维-环氧复合材料的性能①

性能 \ 碳纤维	高强度型	高模量型
抗弯强度　(MPa)	1300～1400	1100
抗弯模量　(GPa)	120	140
抗压强度　(MPa)	900～1000	910
抗压模量　(GPa)	140	210

① 纤维体积含量 60%左右。

2.3 多层复合材料

2.3.1 金属塑料型

1)塑料多层复合材料

以低泡沫或无泡沫塑料作芯子的材料，用金属或硬塑料作为面层而制成。提高了机械强度，特别是刚度及抗冲击性，是一种新型轻质结构材料。如 ABS 三层复合板其构造如图3.2.8-1 芯子为低泡沫 ABC 树脂（相对密度为 0.5～0.7 左右）两面贴无泡沫 ABS 树脂面层。其性能如表 3.2.8-9 所示

表 3.2.8-9　　ABC 三层复合板的基本物理性能

性　　能	厚　度　4 mm 构成比　(1∶2∶1)	厚　度　6 mm 构成比　(1∶4∶1)	厚　度　10 mm 构成比　(2∶6∶2)
相对密度	0.78～0.83	0.70～0.78	0.85
抗拉强度　(MPa)	25～29	23～25	24
抗弯强度　(MPa)	28～55	40～50	51
弯曲弹性模量　(MPa)	1700～2100	1500～1900	2000
冲击强度　(艾氏无缺口)(MPa)	2.1～3.8	1.8～3.5	4
热变形温度　(℃)(185 MPa)	80～85	82～85	85
用　　途	主要用作小艇、台子、椅子及床等结构材料		

2)金属-塑料三层复合板

以高密度聚乙稀为芯子，以铝板作面层的三层复合板，早已在国际市场上销售。在单位表面积同重量的情况下，它的刚度比 ABS 三层复合板高一倍。其主要的机械物理性能如表 3.2.8-10 所示。

表 3.2.8-10　　铝-高密度聚乙烯三层复合板的主要机械物理性能

性　　能	厚　度　4 mm 构成比　(0.3∶3.4∶0.3)	厚　度　4 mm 构成比　(0.5∶3∶0.5)	厚　度　6 mm 构成比　(0.5∶5∶0.5)
密　度　(g/cm^3)	1.22	1.40	1.25
抗拉强度　(MPa)	43～63	49～81	46～57
弯曲弹性模量　(MPa)	26000	31000～40000	23000～27000
抗压强度　(MPa)	29～44	34～60	31～48

3)塑料-青铜-钢三层复合材料

以钢为基体、多孔性青铜为中间层、塑料为表面层制造而成。其机械性能取决于基体，摩擦磨损性能取决于塑料。钢与塑料之间通过多孔性青铜为媒介，获得可靠的结合力，胜于一般喷涂层和粘结层。一旦塑料磨损、露出青铜亦不致严重磨轴。塑料-铜-钢 3 层复合材料的结构，见图 3.2.8-2 所示。它适用于尺寸精度要求高，pv 值较大的无油或少油润滑的轴承，垫片，球头坐等磨擦零件，能在水或其它腐蚀介质中使用。应用较多的有 SF-1 (以聚四氟乙烯为表面层) 和 SF-2 (以聚甲醛为表面层)。一般以带材供应，根据轴承直径和长度，可以先切成片材，然后卷成管或冲成轴瓦。

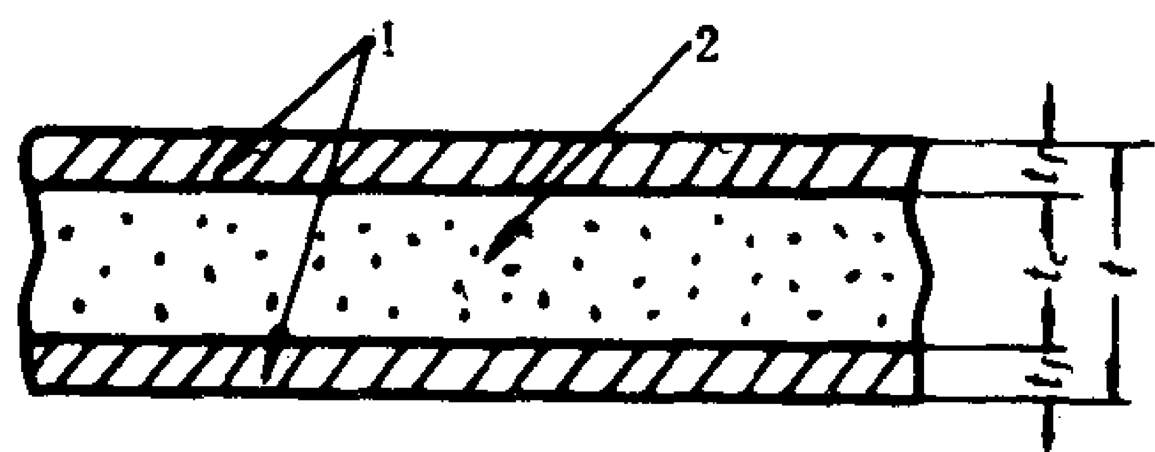


图 3.2.8-1　ABS 三层复合板的构造
1-无泡沫 ABC 树脂面层；2-低泡沫 ABC 树脂

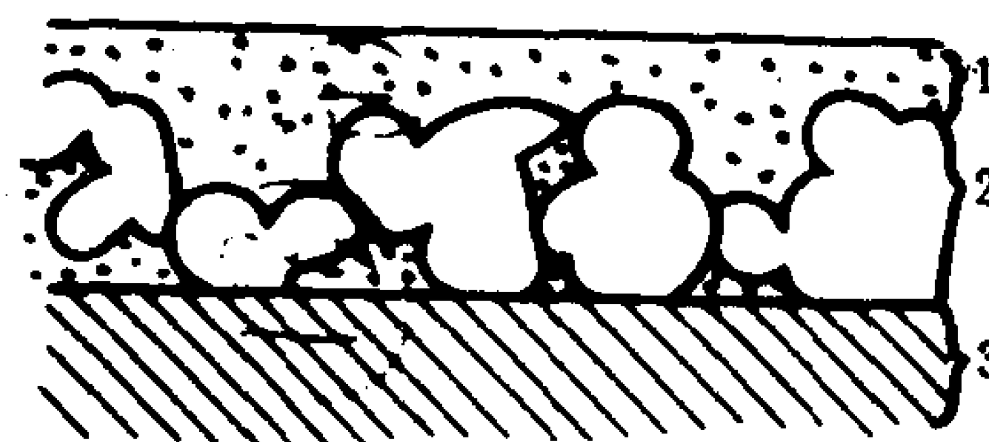


图 3.2.8-2　三层复合材料结构示意图
1-塑料层(0.05～0.3 mm)；2-多孔青铜层(0.2～0.3 mm)；3-钢背层(0.5～3 mm)

SF-1 材料的耐磨性能与其它常用的轴承材料比较，见表 3.2.8-11。

表 3.2.8-11　　　　SF-1与其它轴承材料的耐磨性比较①

材　　料	试验时间 (h)	磨损量 (mm)
SF-1	1000	0.025
含有石墨的铅青铜	158	0.25
含油多孔性青铜	105	0.25
含有 MoS_2的酚醛塑料	73	0.125
减磨石墨	24	0.125
石棉织物浸渍含有MOS2的树脂	0.8	0.125
尼龙	0.3	0.125

① 在无油及 pv 值=0.57 MPa · m/s 条件下。

SF-1允许的载荷 p 值和 pv 值见表 3.2.8-12。

表 3.2.8-12　　　　SF-1允许的 p 值和 pv 值

滑动速度 (m/s)	干摩擦		油润滑	
	p (MPa)	pv 值 (MPa · m/s)	p (MPa)	pv 值 (MPa · m/s)
0.01 以下	50	0.5	—	—
0.01	—	—	120	1.2
0.1	6	0.6	30	3
1.0	1.2	1.2	7	7
5.0	0.4	2	5	25
10.0	0.2	2	3	30
20.0	0.05	1	—	—

SF-2 材料的耐磨性能与其它一些轴承材料相比较见表 3.2.8-13。SF-2允许的最高承载能力见表 3.2.8-14。

表 3.2.8-13　　　　SF-2 与其它轴承材料的耐磨性比较①

材　　料	试验时间 (h)	100 (h)，磨损量 (μm)
SF-2，有油孔	500	0.8
钢背烧结 20% P_b青铜	330	4.0
铸造 10% P_b 青铜	500	12.0
钢背 P_b 青铜，油眼充石墨	42	800
锡基巴氏合金	15	900
磷青铜	2	咬死

① 当 pv 值=0.7 (MPa · m/s) 时。

表 3.2.8-14　　SF-2 最高承载能力（40℃以下）

载荷形式	运转条件	润滑条件	p（MPa）
稳定载荷	极微量连续旋转	脂或油	140
稳定载荷	连续旋转	脂或油（边界润滑）	70
稳定或动载荷	连续旋转	流体动力润滑	45
稳定载荷	摇摆	脂或油	随要求寿命的增长而下降： 140（$<10^5$周） 20（10^7周） 5（$>10^8$周）
微动载荷	连续旋转	脂或油（边界润滑）	

2.3.2 夹层结构材料

夹层结构如图 3.2.8-3 所示。是由两层薄而强的面板(或称蒙皮)，中间夹着一层轻而弱的芯子构成。

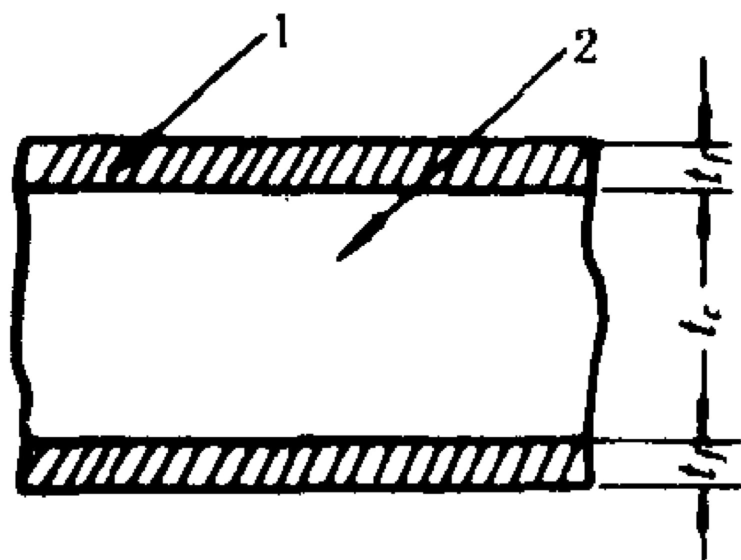


图 3.2.8-3　夹层构造示意图

1-面板；2-芯子材料

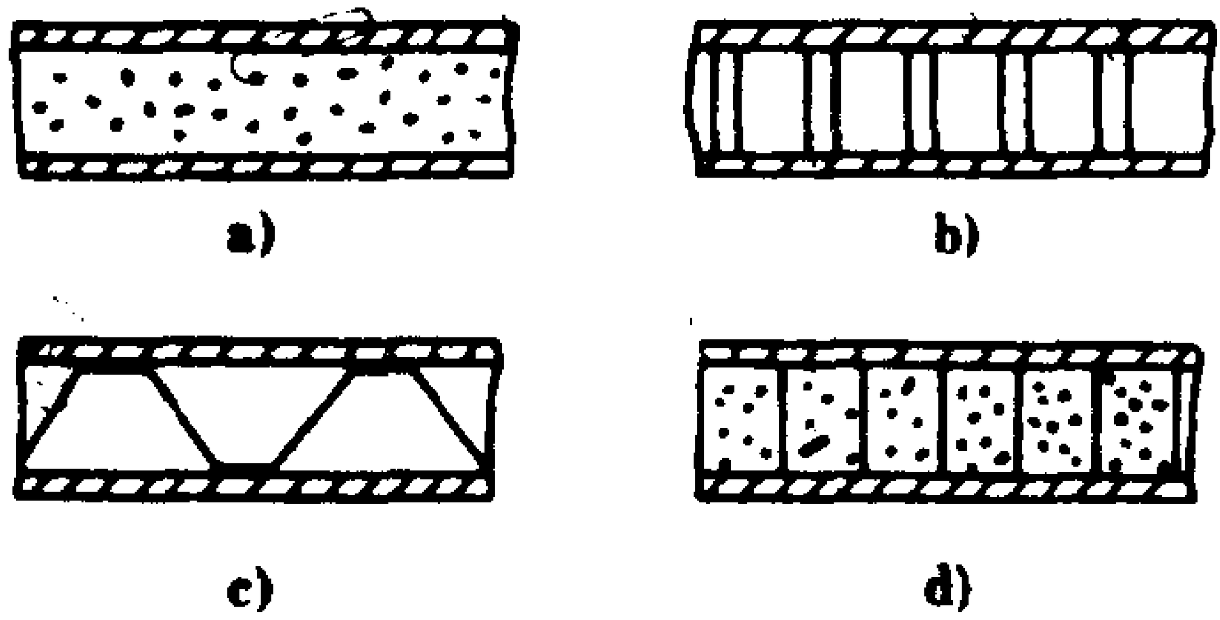


图 3.2.8-4　4 种不同类型的芯子

a) 实心的，如轻质木材、泡沫塑料、泡沫玻璃等；b) 蜂窝的，如六边形、正六边形、菱形等；c) 槽形板的，如波纹、槽形板等；d) 组合式的，如用泡沫塑料填充槽形板或蜂窝等

1)面板　几乎任何板材、如纸、木材、金属、塑料、增强塑料、石棉和纤维板等都可用作面板材料。通常面板厚度为 0.3～3mm，面板在夹层结构中主要起抗拉和抗压作用，因此面板要求抗拉，抗压强度和弹性模量等性能高。

2)芯子　一般芯子的密度为 0.03～0.2g/cm³，起着支承面板和传递剪力的作用，须能承受剪切载荷及来自面板的载荷。实心芯子应用最多的是泡沫塑料，其性能是各向同性的。波纹，槽形板芯子则各向异性，主要用于单向受力结构。4 种不同类型的芯子见图 3.2.8-4。

面板与芯子之间一般用胶粘剂胶接；金属材料制成的可用焊接等方法。

夹层结构的特点和用途见表 3.2.8-15。

表 3.2.8-15　　夹层结构的特点和用途

夹层结构的特点	主要用途
密度小，比强度和比刚度高，一般可减轻质量 15%～30% 表面光滑，提高疲劳强度和具有高的声振疲劳极限 可制成整体结构，减少装配工作量 采用玻璃钢时，则具有好的透波性和绝缘性能 采用泡沫塑料等材料作芯子时，有良好的绝热、隔音等性能 采用石棉、陶瓷蜂窝结构，有耐高温、防火等特点	天线罩、雷达罩、天线反射面、隔板、门板运输容器、发动机罩高低温绝热装置、隔声装置、防火隔板等

附录1 国内外常用钢号近似对照表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
碳素钢	A 3	CT 3			SS 41		St 37 St 42				
	15	15	1015	040 A 15, 045 A 15, En 2 E	S 15 C	XC12	C15 CK15	C15 CK15	C15	1350	12 023
	20	20	1020	040A20, 050 A 20, En 2 C, En2D	S20C	CC20	C22 CK22	C20	C20	1410	N20 21
	25	25	1025	060A25, En4, En4A	S25C	CC28, XC25				1450	12 030
	30	30	1030	060A30	S30C	CC30			C30		12 031
	35	35	1035	060A35, S93	S35C	XC38, C35	C35, CK35	C35, CK35	C35	1550	12 040
	40	40	1040	060 A 40, En 8 D, S 116	S 40 C	XC 42			C 40	1555	12 011
	45	45	1045	060 A 47	S 15 C	XC 45	C 45, CK 45	C45, CK45	C 45	1650	12 050
	50	50	1050	060 A 52, En 43	S 50 C	CC 50	CK 53		C 50		12 051
	55	55	1055	060 A 57, En 9, En 9 K	S 55 C	XC 55, C 55	Cf 56	CK 55	C 56		12 060
	60	60	1060	En 43 D	SWR H 4 B,	XC 60, C 60	C 60, CK 60	CK60, C60	C 60	1655	12 061
	15Mn	15Г	C1115,1115	080A15	SB46	12M5	14Mn4	15Mn4,14Mn4		~1370	12 020

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI. SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
锰结构钢	16Mn	14Г2			SM50			St52			
	20Mn	20Г	C1022,1022	080A20,4S21							13030,13122
	30Mn	30Г	C1033,1033	080A30, En5D,En5K							13 141
	40Mn	40Г	C1036,1036	080A40, 1045			40Mn1	40Mn4			12 011
	45Mn	45Г	1043								
	50 Mn	50 Г	1053,1052	089 A 52,En 43 A, En 43 B En43c		20M5					13 150
	20 Mn2	20 Г2	1320,1321	150 M 19, En 14 A, S 92 S 514,3 T 35, 3 T 45	SMn 420 SMn 21 (JIS 10)		20 Mn5	20 Mn 5			
	30 Mn 2	30 Г 2	1330	~150 M 28, S 514 3 T 35,3 T 45		32 M 5	30 Mn 5	30 Mn 5		2120	13 141
	35 Mn 2	35 Г 2	1335	150 M 36, En 15, En 15 A		35 M 5	36 Mn 5	36 Mn 5		2120	~14 240
锰结构钢	40Mn2	40Г2	1340	~En15A		40M5				2120	~13 142
	45Mn2	45Г2	1345		SMn1 (大同特殊钢)	45M5	46Mn7	45Mn6, K45Mn6			13 250
	50Mn2	50Г2				~55M5		50Mn7			~13 150
锰硅结构钢	25MnSi	25Г2С									
	35SiMn	35СГ				38MS5	37MnSi5	35SiMn5	35MS5		13 240
	42SiMn	42СГ		En46			46MnSi4	46MinSi4			~13 240

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
锰钒结构钢	20MnV						20MnV6				13 123
	25Mn2V						25MnV8	25MnV8			
	42Mn2V						42MnV7	42MnV7			13 242
铬结构钢	15Cr	15X	5115	~523 A 14, ~En 206	SCr415 SCr21(JIS旧)	12C3	15Cr3	15Cr3,15Cr4, K15Cr4			14 120
	20Cr	20X	5120	527 A 19, 527 A 40	SCr420 SCr22(JIS旧)	18C3	20Cr4	20Cr4, K20Cr4			
	30Cr	30X	5130	530 A 30, 530 A 32, En18A	SCr2	32C4	34Cr4	35Cr4, K35Cr4			
	35Cr	35X	5135	530 A 36, En 18 C, S115,S117	SCr1	38C4	37Cr4	35Cr4, K35Cr4			
	40Cr	40X	5140	530 A 40, 530 M 40, En18 S117	SCr440 SCr 4(JIS旧)	42C4	41Cr4	40Cr4, K40Cr4	40C4	2228	14 140
	45Cr	45X	5145,5147		SCr445 SCr5(JIS旧)	45C4					14 150
	50Cr	50X	5150,5152	~735 A 50, En18		50C4					14 160
铬硅结构钢	38CrSi	38XC.37XC						33CrSi6			14 341
	40CrSi	40XC						40CrSi6			
	33SiCrA	33XC									

续上表

钢类	中国	苏联	美国	英国	日本	法国	联邦德国	民主德国	意大利	瑞典	捷克斯洛伐克
	GB (YB)	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
铬锰结构钢	15CrMn	15XГ.18XГ				15MC5	16MnCr5	15MnCr5, K15MnCr5, 16MnCr5			14 220
	20CrMn	20XГ			SMnC420 SMnC21 (JIS旧)	20MC5	20MnCr5	20CrMn4, 20CrMn5			14 221
	40CrMn	40XГ						40MnCr4			
铬锰硅结构钢	20CrMnSi	20XГC									
	25CrMnSi	25XГC									14 330
	30CrMnSi	30XГCA			SMK1 (大同制钢)			30SiMnCr4			14 331
	35CrMnSiA	35XГCA			SMK2 (大同制钢)			35SiMnCr4			14 342
铬钒结构钢	20CrV	20XΦ	6120				22CrV4	20CrV4, K20CrV4			15 232
	40CrV	40XΦA	6140				42CrV6	42CrV6			
	45CrV		6145	~735 A 50, En 50							~15 260
	35Cr2V						~30CrV9				15 211
铬锰钛结构钢	20CrMnTi	18XГT			SMK22 (大同制钢)						
	30CrMnTi	30XГT									

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
铬钼结构钢	12CrMo	12XM	~4119; A 335, P2(ASTM)	1501-620 Gr.B		12CD4	13CrMo44	13CrMo44, D388(SES)			N5 120
	15CrMo	15XM	A387Gr,B (ASTM)	1635	STT42,STB42, STC42	12CD4	16CrMo44	K15CrMo44			15 121
	20CrMo	20XM	4119, 4118	CDS12 CDS110	SCM420 SCM22 (JIS旧)	18CD4	20CrMo5	20CrMo4			15 124
	30CrMo	30XM	4130	CDS13	SCM430, SCM2(JIS旧)				30CrMo4		15 131
	35CrMo	35XM	E 4132, E 4135	708 A 37, En 198, CDS 13	SCM 435, SCM 3(JIS旧)	35CD4	34CrMo4	34CrMo5	35CrMo4	2234	15 340
	42 CrMo		4140	708 M 40, En 19 A	SCM 440, SCM 4 (JIS旧)	42 CD 4	42 CrMo 4	40 CrMo 4	40 CrMo 4	2244	
铬锰钼结构钢	15 CrMnMo		~4119								
	20 CrMnMo	18 XГM	~4119								
	40 CrMnMo	40 XГM, 38 XГM	~4142	708 A 42, En 19 C							

续上表

钢类	中国	苏联	美国	英国	日本	法国	联邦德国	民主德国	意大利	瑞典	捷克斯洛伐克
	GB (YB)	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
铬钼钒结构钢	12 CrMoV	12 XMФ									15111, 15123
	15 CrMoV							11 CrMoV 6			
	24 CrMoV					20 CDV 6	21 CrMoV 5.5	24 CrMoV 5.5			N 5 236
	35 CrMoV	35 XMФ		~HCRS.5 (BSC)				35 CrMoV 5			
	12 Cr 1 MoV	12 X 1 MФ					13 CrMoV 42				
	15 CrMo 1 V		A 356 Gr, 9 (ASTM)					13 CrMoV 4.2			~15 320
	25 Cr 2 MoVA	25 X 2 MФA									
	25 Cr 2 Mo 1 VA	25 X 2 MФA, ЭИ 732(ТУ)			~FBS-2						
铬钼钨钒结构钢	18 Cr 3 Mo WVA	ЭИ 1578(ТУ)						17 CrMoW 11			
	20 Cr 3 Mo WVA	ЭИ 415(ТУ) ЭИ 579(ТУ)					21 CrVMo W 12	21 CrVMo W 12			15 420
硼结构钢	40 B		~TS1 4 B 35								
	45 B		50 B 46 H								
	40 MnB		~TS 14 B 35 H								
	45 MnB		~TS 14 B 50 H								

续上表

钢类	中国	苏联	美国	英国	日本	法国	联邦德国	民主德国	意大利	瑞典	捷克斯洛伐克
	GB (YB)	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
氮化结构钢	38 CrMo AIA	38 XMЮA	6470 E (AMS)	905 M 39, En 41 B	SACM 645, SACM 1 (JIS旧)	45 CAD 6-12	34 CrAIMo 5	K 38 CrA IMo 6	38 CrA IMo 7	2940	15 340
	38 CrWV AIA	38 XBФЮA									
弹簧钢	65	65	C 1065, 1065	080 A 67	SUP 2, SWR 7	XC 65	CK 67	CK 67			12 071
	75	75	1074		SUP 3, SWR 9	~XC 70, XC 80	C 75, MK 75				12 072
	85	85	C 1085, 1084		SUP 3						
	60 Mn	60 Г	1060	080 A 62, En 43 D							
	65 Mn	65 Г	1065, C 1065	080 A 67, En43E							
	60 SiMn	60 CГ	9260	En 45 A	SUP 6		60 SiMn 6				13 270
	60 SiMnA	60 CГA									
	50 Si 2 Mn	50 C 2				~50 S 7	51 Si 7	48 Si 7	50 Si 7	~2090	
	55 Si 2 Mn	55 C 2	9255	250 A 53, En 45, 1429		55 S 7	55 Si 7			2090	13 261
	60 Si 2 Mn	60 C 2	9260					60 SiMn 7 K 60 SiMn 7			
	60 Si 2 MnA	60 C 2 A	9260	250 A 58, 250 A 61, En 45 A	SUP 6						
	63 Si 2 MnA	63 C 2 A	9260		SUP 7	61 S 7	65 Si 7	65si7			13 270

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
弹簧钢	60 Si 2 CrA	60 C 2 XA						62 SiCr 5			
	60 Si2CrVA	60 C 2 XΦA									
	65 Si 2 MnWA	65 C 2 BA									
	70 Si3MnA	70 C 3 A									
	50 CrVA	50 XΦA	6150	735 A 50, En 47	SUP 10	50 CV 4	50 CrV 4	K 50 CrV 4	50 CrV 4	2230	15 260
滚珠轴承钢	GCr 6	ШХ 6	E 50100			~100 C 3	105 Cr 2	X 110 Cr 2			14103, 14101
	GCr 9	ШХ 9	E 51100, 51100	~En 31	SUJ 1	100 C 5	105 Cr 4	105 Cr 4			14102, ~14200
	GCr 9 SiMn				SUJ 3				100 CM 4		
	GCr 15	ШХ 15	E 52100, 52100	534 A 99, En 31	SUJ 2	100 C 6	100 Cr 6	100 Cr 6	100 C 6		14 100
	GCr 15 SiMn	ШХ 15 СГ					100 CrMn 6	20 MnCr 4, K 20 MnCr 4, 20 MnCr5	~25 MC 6		14 221
碳素工具钢	T 7	У 7			SK 6	$Y_3 65$	C 70 W 2	C 70 W 2			19 132, 19 133
	T 7 A	У 7 A				$Y_1 65$	C 70 W 1	C 70 W 1			
	T 8	У 8	W 108 C	Steel for Cold Working D 1, BW 1 C	SKU 5	Y_2 75	C 80 W 2	C 80 W 2	C 85 KU		19 152
	T 8 A	У 8 A	W 108 C.S	BC 8 (BSC)		Y_1 75	C 80 W 1			1780	
	T 9	У 9	W 109 C	SK 4		Y_3 90		C 90 W 2			
	T 9 A	У 9 A	W 109 C.S			$Y_2 90$		C 90 W 1			

续上表

钢类	中国	苏联	美国	英国	日本	法国	联邦德国	民主德国	意大利	瑞典	捷克斯洛伐克
	GB (YB)	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
碳素工具钢	T 10	У 10	W 110 C	Steel for Cold Working D 1, BW 1 C	SK3	Y_2 105	C 100 W 2	C 100 W 2	C 98 KU	1880	19 192
	T 10 A	У 10 A	W 110 C.S	BC 10(BSC)		Y_2 105	C 100 W 1	C 100 W 1	C 98 KU		19 191
	T 11	У 11				~Y_2 105				1880	19 215
	T 12	У 12	W 112 C	Steel for Cold Working D 1, BW 1 C	SK 2, SKU 2	Y_2 120	C 115 W 2	C 115 W 2	C 112 KU	1885	19 222
	T 12 A	У 12 A	W 112 C.S			Y_1 120	C 110 W 1	C 110 W 1			19 221
	T 13	У 13		Steel for Cold Working D 1, VHRD-14(BSC)	SK1, SKU 1	Y_2 135	C 130 W 2	C 130 W 2			19 255
	T 13 A	У 13 A		BC 14 (BSC)		~Y_2 135	C 125 W 1				19 252
	T 8 MnA	У 8 ГА			SK 5	Y_3 90	C 85 WS	C 85 WS			~19 146
合金工具钢	9 Mn 2 V		~O 2			80 M 8	90 MnV 8	90 MnV 8	U 85 MV 8		19 312
	MnCrWV		O 1		~SKS 3					2140	19 712
	5 MnSi						50 NCV 12	60 MnSi 4			
	8 MnSi						C 75 W 3	C 75 W 3			
	7 MnSi 2		~S 4				70 Si 7	70 Si 7			
	6 SiCr	~6 XC				Y 60 SC 7	64 SiCr 5	64 SiCr 5			19 452
	9 SiCr	9 XC		C 4(BSC)			90 CrSi 5	90 CrSi 5		2092	
	SiCr						125 CrSi 5	125 CrSi 5			19 460

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
合金工具钢	SiCr 3							150 CrSi 14			
	4 SiCrV	~4 XC					45 SiCrV6	45 CrSiV6			19 457
	Cr 2	X.	L 3			Y 100 C 6	105 Cr 5	105 Cr 5			19 426
	Cr	X 09				100 C 3	105 Cr 4, 90 Cr 3	110 Cr 2			19 423
	Cr 06	X 05			SKS 8		~110 Cr 2	110 Cr 2			19 420
	9 Cr 2	9 X		BL 3		~Y 100 C 6	85 Cr 7	85 Cr 7			
	8 Cr	~y 7 X	W 5			$Y_2$90 C	85 Cr 1	85 Cr 1,			19 418
	8 Cr 3	8 X 3									
	Cr 12	X 12		Steel for cold Working A 1	SKD 1	Z 200 C 12	X 210 Cr 12	X 210 Cr 11, 210 Cr 46	UX 200 C 13		19 436
	CrMn	XГ	~L 4			~80 M 8	145 Cr 6	~145 CrV 6			19 422
	5 CrMnMo	5 XГM	VIG		SKT 5		~40 CrMn Mo 7	~40 CrMn Mo 7			N 9 520
	50 CrNiMo	5XHM	~L 6		SKT 4	60 NCD V 06-02, 55 NCD 7-03	55 NiCr MoV 6	55 NiCr MoV 6	~U 52 ND 65	~2550	N 9 662
	CrW	XB, ЭП 50(ТУ)	07		SKS 2	100 WC 20	~110 WCr V 5	110 WCr V 5			19 712
	CrW 5	XB 5			SKS 1	120 WC 15-02	X 130 W 5	130 W 19	UX 140 W 5		19 714
	Cr 12 W		~D 6		~SKD 2		X 210 Cr W 12	210 CrW 46		2312	N 9 437
	3 Cr 2 W 8 V	3 X 2 B 8	H 21	A 1 W-Cr	SKD 5	Z 30 WC 09~03	X 30 WCr V 9-3	30 WCr V 34,11	UX 28 W 9	2730	19 721

续上表

钢类	中国	苏联	美国	英国	日本	法国	联邦德国	民主德国	意大利	瑞典	捷克斯洛伐克
	GB (YB)	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
合金工具钢	CrWMn	ХВГ		Steel for Cold Working C	SKS 31	80 M 8	105 WCr 6	100 WCr 6	U 100 WC		
	4 CrW 2 Si	4 ХВ 2 С							~40 W 20 KU		
	5 CrW 2 Si	5 ХВ 2 С		BSI	~SKS 41	45 WC 20		45 WCrV 7		~2710	19 732
	6 CrW 2 Si	6 ХВ 2 С									19 733
	Cr 12 MoV	Х 12 М		Type(A)2	SKD 11	Z 200 C 12	X 165 Cr WoV 12	165 CrMo WV 46		~2310	
	4 CrVMoW						45 CrMoW 58	45 CrMoW 5.8			
	3 CrA 1						34 CrA 16			~2940	14 340 F
	8 CrV	85 ХФ, 8 ХФ	L 2				80 CrV 3	80 CrV 3			N 9 426
	CrV	ХФ	W 7, L 3				115 CrV 3	115 CrV 3	U 100 CM 4		N 9 424
	W	В 1	F 1	~BF 1	SKU 8	~100 WC 10	120 W 4	120 W 4	115 W 4 KU		19 701
	W 2	~В 2 Ф			SKS 7		115 W 8	115 W 8			
	5 W 2 CrSiV						60 WCrV 7	55 WCrV 7			
	4 W2CrSiV					45 WC 20-04	45 WCrV 7	45 WCrV 7		2710	
	3 W 2 CrSiV					45 WC 20-04	35 WCrV 7	35 WCrV 7			
	3 W 4 Cr SiV						X 30 WCrV 41	30 WCrV 15	U 28 W 45		19 740
	3 W 4 Cr 2 V	4 Х 2 В 5 ФМ			SKD 4	40 WCD S 35-12	X 30 WCr V 53	30 WCr V 17.9			19 720
	WCrV	135 W			SKS 21	~100 WC 10	120 WV 4	120 WV 4		2705	19 711
	W 3 CrV		~F 3		SKS 11		142 WV 13	142 WV 13			

续上表

钢	中 国	苏 联	美 国	英 国	日 本	法 国	联邦德国	民主德国	意 大 利	瑞 典	捷克斯洛伐克
类	GB（YB）	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
合金工具钢	V	Φ	W 210 E	BW 2	SKS 43	Y_1 105 V	100 V 1	100 V 1,			19 356
	8 V		W 209 E		SKS 44	$Y_1$75 V				2900	19 312
	8 W 2 CrV				SKS 42			8 W 2 CrV 8			
	9 CrWMn	9 XBΓ	01		SKS 3						
	9 Mn 2		02								
	Cr 6 WV	X 6 BΦ	A 2		SKD 12						
高速工具钢	W 9 Cr 4 V 2	P 9, ЭИ 262	T 7	CRD 14(CRD)	SKH 6	Z 70 WD 12	S 9-1-2, ABCH（DIN旧）	X 82 WV 9.2	X 88 WV 08 KU		19 800
	W 9 Cr 4 V	ЭИ 347									
	W 12 Cr 4 V 4Mo	P 9 Φ 5, ЭИ 706, P 14 Φ 4				12-0-4, Z 125 WV 15 W（NF旧）	S 12-1-4, EV 4	X 125 W V 12.4			19 810
	W 18 Cr 4 V	P 18, PΦ 1	T 1	BT 1	SKH 2	18-0-1 Z 80 W 18（NF旧）	S 18-0-1, B 18	X 74 WV 18.1	X 75 W 18 KU	2750	N 9 824
不锈耐热钢	0 Cr 13	08 X 13	410 S	403 S 17		Z 6 C 13	X 7 Cr 13		X 6 Cr 13		
	1 Cr 13	12 X 13 (ЭЖ 1, Ж 1)	403	410 S 21, S 61, En 56 A	SUS 430	Z 12 C 13	X 10 Cr 13	X 10 Cr 13	X 15 C 13	2302	17 021
	1 Cr 17	12 X 17 (ЭЖ 17)	430, 51430.	430 S 15, En 60	SUS 430	Z 8 C 17, Z 10 C 17, Z 12 C 18	X 8 Cr 17	X 8 Cr 17	X 8 Cr 17	2320	17 041
	0 Cr 17 Ti	08 Cr 17 T					X 8 CrTi 17	X 8 CrTi 17			
	1 Cr 17 Mo2Ti						X 8 CrMo Ti 17	X8CrMo Ti 17			
	Cr 28	X 28 (ЭИ 349)	446, 51446					X 8 Cr 28			

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
不锈耐热钢	1 Cr 25 Ti	X 25(ЭИ 181) 15X 25 T (ЭИ 439)	446, 51446, 60446,			Z 15 C 27 Z 20 C 25	X 8 Cr 28	X 8 Cr 28			N 7 061 (N 7 017)
	2 Cr 13	20 X 13 (ЭЖ 2, Ж 2)	420, 51210	420 S 29, 420 S 37, S 62, En 56 B, En 56 C	SUS 420 J 1	Z 20 C 13	X 20 Cr 13	X 20 Cr 13	X 20 Cr 13	2303	17 023
	3 Cr 13	30 X 13 (ЭЖ 3, Ж 3)	~420,	420 S 45, En 56 D, STA 5/V 25 M	SUS 420 J 2	Z 30 C 13			X 30 Cr 13	2304	17 023
	4 Cr 13	40 X 13				Z 40 C 13	X 40 Cr 13	X 40 Cr 13	X 40 Cr 13		~17 029
	3Cr17Mo						X35CrMo17	X35CrMo17			
	9 Cr 17 MoVCo						X 90 CrMo VCo 27				
	Cr 25 Mo 3 Ti							X 12 CrMo Ti 25			
	9 Cr 18 MoV		440 B, 51440 B		SUS 440 B		X 90 Cr MoV 18	X 90 CrMo V 18	X 8 CrMo 17		
	9 Cr 18	95 X 18									17 042
	Cr 17 Ni 2	X 17 И 2	431, 51431	S 80, En 57	SUS 44	Z 15 CN 16-2	X 22 Cr Ni 17		X 20 CN 16	2321	
	Cr 14 S	~X 14 (ЭИ 241)	416, 50416 F	416 S 21, En 56 AM		Z 12 CF 13			X 12 CrS 13	2380	
	Cr 15							X 8 Cr 15			

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
不锈耐热钢	1 Cr 18 Mn 8 Ni 5	12 X 17 AΓ 9 H 4(ЭИ 378)	202, 30202	284 S 16	SUS 202	Z 10 CMN 19-9, Z 10 CMN 18-7, Z 12 CMN 18-7	X 8 CrMn Ni 189			2357	
	0 Cr 18 Ni 9	04 X 18 H 0	304, 30304, 60304	304 S 15, En 58 E	SUS 304, SUS 27(JIS旧)	Z 7 CN 18-10, Z 6 CN 18-10, Z 5 CN 18-08	X 5 CrNi 189	X 5 CrNi 18.9	X 5 CrNi 1810	2333, 2332	17 240
	1 Cr 18 Ni 9	120 X 18 H 9(X 18 H 9, ЭЯ 1)	302, 30302,	302 S 25, En 58 A, STA 5/V 27	SUS302, SUS 40 JIS旧)	Z 12 CN 18-10	X 12 CrNi 188	X12CrNi18.8	X 10 CrNi 1809	2331	17 241
	1 Cr 18 Ni 9 Ti	12 X 18 H 9 T, (X 18 H 9 T, ЭЯ 1 T)	321, 30321	321 S 20, En 58 B, En 58 C, S 110	SUS 321, SUS 29 (JIS旧)	Z 10 CNT 18-11	X 10 CrNi Ti 189	X 10 CrNi Ti 18.9	X 6 CrNi 1810	2337	17 246 (N 7 356)
	1 Cr 18 Ni 11 Nb	08 X 18 H 12 Ь, (X 18 H 11 Ь, ЭИ 724, ЭИ 398, ЭИ 402)	347, 30347	347 S 17, En 50 F, 1631 BN b, ~En 58 G	SUS 347, SUS 43 (JIS旧)	Z 6 CNNb 18-10	X 10 CrNi Nb 189	X 10 CrNi Nb 18.9	X 8 CNNb 1811	2338	N 7 247
	Cr 5 Mo	X 5 M (12 X 5 M)	501, 502, 51501			Z 12 CD 5	12 CrMo 195				17 102
	Cr 6 SiMo	X 6 CM (ЭСХ 6 M)									17 102
	4 Cr 9 Si 2	X 9 C 2(4 X 9 C 2, ЭСХ 8)		410 S 45, En 52	SUH 1	Z 45 CS 9	X 45 Cr Si 93	X 45 Cr Si 34			17 115

续上表

钢类	中国 GB (YB)	苏联 ГОСТ	美国 AISI, SAE	英国 BS	日本 JIS	法国 NF	联邦德国 DIN	民主德国 TGL	意大利 UNI	瑞典 SIS	捷克斯洛伐克 ČSN
不锈耐热钢	4 Cr 10 Si 2 Mo	4 X 10 C 2 M			SEH 3	Z 45 CSD 10					
	1 Cr 13 Si 3						X 10 Cr Si 13				
	Cr 13 SiAl							X 10 CrAl 13			
	1 Cr 18 Si 2		~442				X 10 CrSi 18				
	Cr 13 Al 4	X 13 Ю 4									
	1 Cr 25 Si 2						X 10 Cr Si 29				
	Cr 24 Al 2 Si					Z 10 CAS 24	X 10 CrAl 24				
	4 Cr 14 Ni 14 W 2 Mo	4 X 14 H 14 B 2 M(ЭИ 69)	5700 A	331 S 40, En 54	SEH 4	Z 45 CN WS 0-14					N 7 323
	Cr 15 Ni 36 W 3 Ti	XH 35 BT	330	~316		~Z 10 NCS 33-20	X 12 NiCr Si 3616				
	1 Cr 18 Ni 12Mo2Ti	10 X 17 H 13 M 2 T(ЭИ 448)		320 S 17, En 58 J		Z 8 CNDT 17-12	X 10 CrNi Mo Ti 1810	X 10 CrNiMo Ti 18.10	X 6 NiMo Ti 1712		17 353
	0 Cr 18 Ni 18 Mo2Cu 2 Ti						X 5 CrNiMo CuTi 1818				
	1 Cr 14 Ni 14 W 2 MoTi	1 X 14 H 14 B 2 MT									
	1 Cr 17 Al5	1 X 17 Ю 5									
	1 Cr 18 Ni 12 Ti	1 X 18 H 12 T									TP 321

续上表

钢类	中国	苏联	美国	英国	日本	法国	联邦德国	民主德国	意大利	瑞典	捷克斯洛伐克
	GB（YB）	ГОСТ	AISI, SAE	BS	JIS	NF	DIN	TGL	UNI	SIS	ČSN
不锈耐热钢	2 Cr 13 Ni 4 Mn 9	X 13 H 4 Г 9									
	Cr 9 Mn 18							StCrMn 17			
	Cr 14 Mn 14 Ni	X 14 Г 14 H									
	Cr 8 Al 5							CrAl 85			
	Cr 20 Al 5 Co 2							CrAlCo 2553			
	Cr 18 Ni 20 Mo 2 Cu 2 Nb							X 5 CrNiMo CuNb 2018			
	Cr 18 Ni 8 Mo 2 Cu 2 Ti							X 5 CrNiMo CuTi 1818			
	Cr 18 Ni 12 Mo 3 Ti	X 18 H 12 M 3 T	326								

注：GB——中国国家标准
YB——中国冶金工业部部标准
ГОСТ——苏联国家标准
AISI——美国钢铁学会标准
SAE——美国汽车工程学会标准
BS——英国标准
JIS——日本工业标准
NF——法国标准
DIN——西德工业标准
TGL——德意志民主共和国技术条件
UNI——意大利标准
SIS——瑞典工业标准
ČSN——捷克斯洛伐克标准
BSC——美国厂家名称
CRD——美国厂家名称

附录 2　国内外常用有色金属材料牌号近似对照表

(一) 铜及铜合金

材料类别	中国 GB	苏联 ГОСТ	日本 JIS	美国 ASTM	英国 BS	联邦德国 DIN
电解铜锭	Cu-1 (99.95)	M0 (99.95)	99.96			
	Cu-2 (99.90)	M1 (99.90)		CATH (99.90)	99.90	KE-Cu (99.90)
纯铜加工产品	T1	M0				
	T2	M1	C1100□(TCu□1)	C11000	C101、C102	OF-Cu58 OF-Cu57
	T3	M2			C104	
	(T4)	M3				C-Cu
	TU1	A 系列无氧铜	C1011□(EOFCu□)	C10100		
	TU2	Б 系列无氧铜	C1020□(OFCu□)	C10200	C103	OF-Cu
	(TUP)	ДHP	C1201□、C1220□ (DCu□1B)	C12000、 C12200	C106	SF-Cu、SW-Cu
黄铜加工产品	H96	Л96	C2100□(RBS□1)	C21000		CuZn5
	H90	Л90	C2200□(RBS□2)	C22000	CZ101	CuZn10
	H80	Л80	C2400□(RBS□4)	C24000	CZ103	CuZn20
	H70	Л70	C2600□(BS□1)	C26000	CZ106	CuZn30
	H62	Л62	C2 801 □(BS□3)		CZ108	CuZn37
	H59	Л59	C2800□(BS□3)	C28000	CZ109	CuZn40
	HPb63-3	ЛС63-3	C3601□、C3602□ (PbBS□11)	C36000	CZ124	CuZn36Pb3
	HPb59-1	ЛС59-1	C3771□ (PbBS□14)	C37700	CZ122	CuZn40Pb2
	HSn70-1	ЛО70-1	C4430□ (BsT□1)	C44300	CZ111	CuZn28Sn
	HSn60-1	ЛО60-1	C4640□、C4641□ (NBs□2)	C46400	CZ113	CuZn39Sn
	HA177-2	ЛА77-2	C6870□、C6871□ (BsT□3)	C68700	CZ110	CuZn20A1
	HFe59-1-1	ЛЖМц59-1-1	C6782□、C6783□ (HBs)		CZ114	CuZn40A11
	HMn58-2	ЛМц58-2	(HBs□2)			CuZn40Mn

续上表

材料类别	中国 GB	苏 联 ГОСТ	日 本 JIS	美 国 ASTM	英 国 BS	联邦德国 DIN
青铜加工产品	QSn4-3	БР.ОЦ4-3				Cu-Sn4Zn
	QSn4-4-4	БР.ОЦС4-4-4	C5441□ (PbPB□2)	C54400		
	QSn6.5-0.1	БР.ОФ6.5-0.15	C5191□(PB□2)		PB103	Cu-Sn6
	QSn7-0.2	БР.ОФ7-0.2	C5210□、C5212□ (PB□3)	C52100	PB104	Cu-Sn8
	QSn4-0.3	БР.ОФ4-0.25	C5101□(PB□1)	C51000	PB102	
	QAl5	БР.А5			CA101	Cu-Al5
	QAl9-4	БР.АЖ9-4	C6191□、C6161□ (AB□3)	C61900	CA103、 CA104	CuAl8Fe
	QAl 10-3-1.5	БР.АЖМЦ 10-3-1.5	C6241□(AB□1)	C62400		CuAl10Fe
	QAl 10-4-4	БР.АЖН10-4-4	C6301□、C6280□ (AB□4)	C63000	CA105	CuAl10Ni
	QSi3-1	БР.КМЦ3-1	C6561□(SiB□)		CS101	CuSi3Mn
	QMn5	БР.МЦ5				CuMn5
	QBe1.9	БР.БНТ1.9	c1720□(BeCu□2)	C17200	CB101	CuBe2
	QBe1.7	БР.БНТ1.7	C1700□(BeCu□1)	C17000		CuBe1.7

（二）铝及铝合金

材料类别	中国 GB、YB	苏联 ГОСТ	日本 JIS	美 国		英国 BS	联邦德国 DIN
				ASTM	AA		
铝锭	Al-05(99.999)		特 1 种(99.90)				Al 99.9 H
		A 85(99.85)	特 2 种(99.85)				
		A 8(99.80)					Al 99.8 H
	Al 99.7	A 7(99.7)	1种(99.7)				Al 99.7 H(99.7)
	Al 99.6	A 6(99.6)					
	Al 99.5	A 5(99.5)	2 种(99.5)				Al 99.5 H(99.5)
	Al 99.0	A 0(99.0)	3 种(99.0)				Al 99 H
	Al 98.0						
纯铝加工产品	L 1(99.7)	АД 00(A 00)	Al 070 □	1070	1070	□1 A	Al 99.7
	L 2(99.6)	A 0	Al 060	1060(996 A)	1060		Al 99.6
	L 3(99.5)	АД 0(Al)	Al 050 □	1050	1050	□1 B	Al 99.5
	L 4(99.3)	АД 1	AlN 30	1030	1030		
	L 5(99.0)	A 2	Al 100 □ Al 200 □	1100(990 A)	1100	□1 C	Al 99
	L 6(98.8)	АД					

续上表

材料类别	中国 GB、YB	苏联 ГОСТ	日本 JIS	美国 ASTM	美国 AA	英国 BS	联邦德国 DIN
铝合金加工产品	LF 2	АМГ	A 5052 □	5052(GR 20 A)	5052	N□ 4	AlMg 3
	LF 3	АМГ 3	A 5154 □	5154	5154	N□ 5	AlMg 4
	LF 5	АМГ 5	A 5056 □	5056	5056	N□6	AlMg 5
	LF10	АМГ 5 П					
	LF21	АМЦ	A 3003 □	3003	3003	N□ 3	Al-Mn
	LY 1	Д 18 П	A 2117 □	2117	2117		AlCu 2.5 Mg 0.5
	LY 2	ВД 17				N□ 4	
	LY 8	Д 1 П	A 2017 □	2017	2017	H□ 14	AlCuMg 1
	LY 11	Д 1					
	LY 9	Д 16 П	A 2024 □	2024	2024		AlCuMg 2
	LY 12	Д 16					
	(LD 1)(旧号)	АД 31	A 6063 □	6063	6063	H□ 9	AlMgSi 0.5
	LD 2	АВ(АК 5)	A 6061 □	6061	6061	H□ 20	
	LD 5	АК 6					
	LD 8	АК 4	A 2 N 01 □	2618	2618	H□ 16	
	LD 9	АК 2	A 2018 □	2018	2018		AlCuNi
	LD 10	АК 8	A 2014 □	2014	2014	H□ 15	AlCuSiMn
	LC 3	В 94					
	LC 4	В 95					
	LC 9		A 7075 □	7075	7075		AlZnMgCu 1.5
	LT 1	АК	A 4043	S 5 A	4043		SA 1 Si 5

(三) 其它有色金属材料

材料类别	中国 GB	苏联 ГОСТ	日本 JIS	美国 ASTM	英国 BS	联邦德国 DIN	法国 NF
锡锭	Sn-0(99.95)			AA(99.95)		Sn 99.95	
	Sn-1(99.90)	01(99.90)	1种$^{A}_{B}$(99.90)	A(99.80)	T 1(99.90)	Sn 99.90	A(99.85)
	Sn-2(99.75)		2种(99.80)	B(99.80)	T 2(99.75)	Sn 99.75	B(99.75)
	Sn-3(99.56)	02(99.565)	3种(99.50)	C (99.65) D (99.50)		Sn 99.50	
	(Sn-4)(99.00)	03(98.49)		E(99.90)	T 3(99.00)	Sn 99.00	C (99.00) D (98.00)

续上表

材料类别	中　国 GB	苏　联 ГОСТ	日　本 JIS	美　国 ASTM	英　国 BS	联邦德国 DIN	法　国 NF
铅锭	Pb-1(99.994)	C 00(99.9985)					
		C 0(99.992) C 1(99.985)	特种(99.99) 1 种(99.97)		TYPeA (99.99)	Pb 99.99 Pb 99.985	(99.985)
	Pb-2(99.90)	C 2(99.95) C 3(99.90)	2 种(99.95) 3 种(99.90) 4 种(99.80)	Corroding Lead (99.94) Chemical Lead (99.90) Acidcopper Lead (99.90) Common Desilverized Lead (99.85)		Pb 99.94 Pb 99.90 Pb 99.75(再生)	(99.94) (99.90)
	Pb-3(99.00)		5 种(99.50)			Pb 98.5(再生)	
锌锭	Zn-0(99.995)	ЦВО(99.995)	最纯锌锭 (99.995)			Zn 99.995	Zn 9(99.995)
	Zn-1(99.99)	ЦВ(99.99)	特种锌锭 (99.99)	Special High Grade (99.99)	Zn 1(99.99)	Zn 99.99	
		ЦОА(99.98)					
	Zn-2(99.95)	Ц 0(99.975) Ц 1(99.95)	普通锌锭 (99.97)		Zn 2 (99.95)	Zn 99.95	Zn 8(99.95)
	Zn-3(99.90)			HigH Grade (99.90)			
	Zn-4 (99.50)		蒸馏锌锭特种 (99.6)	Intermediate (99.50)	Zn 3 (99.5)	Zn 99.50	Z 7 (99.50)
	Zn-5(98.70)	Ц 2(98.70)	蒸馏锌锭 1 种 (98.5)	Brass Special (99.0)	Zn 4 (98.5)	Zn 98.5	Z 6(98.50)
		Ц 3(97.5)	蒸馏锌锭 2 种 (98.0)	Prime Western (98.0)		Zn 97.5	Z 5(98.0)

注：①JIS 铜、铝及其合金加工产品牌号后面的"□"，系表示型材的类型，用英文字母来区分，各个字母的代表涵义如下：P—板材　R—条材　W—线材　B—棒材　BE—挤制棒材　BD—拉制棒材　T—管材　TE—挤制管材　TD—拉制管材　TW—焊接管材　F—锻件……等等　例如：C 1020 P、C 1020 R、C 1020 T、C 2600 B、C 2600 W、A 1100 BE、A 1100 BD。

②B.S.铝及铝合金加工产品牌号中的"□"，也是表示型材的类型，用英文字母来区分，其代表涵义是：S—板条　E—挤制的棒材或线材、型材　T—拉制管件　G—拉制的棒材或线材　F—锻件　R—铆钉材料。但就纯铝而言，这个字母应放在牌号前面，例如：SIA、SIB、SIC。

③产品牌号中带有括号"(　)"者为旧牌号。

附录 3 钢材理论质量的计算公式

序号	钢材类别	计算公式	代号说明
1	圆钢	$F=0.7854d^2$ (mm²) $W=0.0061654d^2$ (kg/m)	F（断面积，mm²） d（直径，mm） W（理论单位长度质量，kg/m）
2	方钢	$F=a^2$ (mm²) $W=0.00785a^2$ (kg/m)	a（边宽，mm）
3	六角钢	$F=0.866a^2=2.598S^2$ (mm²) $W=0.0203943S^2=0.0067983a^2$ (kg/m)	a（对边距离，mm）
4	八角钢	$F=0.8284a^2=4.8284S^2$ (mm²) $W=0.0379S^2=0.006503a^2$ (kg/m)	S（边宽，mm）
5	钢板、扁钢、带钢	$F=a\times\delta$ (mm²) $W=0.00785a\delta$ (kg/m)	a（边宽，mm） δ（厚，mm）
6	等边角钢	$F=d(2b-d)+0.2146(r^2-2r_1^2)$ (mm²) $W=0.00785[d(2b-d)+0.2146(r^2-2r_1^2)]$ $\approx0.00795d(2b-d)$ (kg/m)	d（边厚，mm），b（边宽，mm）； r（内弧半径，mm） r_1（端弧半径，mm）
7	不等边角钢	$F=d(B+b-d)+0.2146(r^2-2r_1^2)$ (mm²) $W=0.00785[d(B+b-d)+0.2146(r^2-2r_1^2)]$ $\approx0.00795d(B+b-d)$ (kg/m)	d（边厚，mm）；B（长边宽，mm）； b（短边宽，mm）；r（内弧半径，mm）； r_1（端弧半径，mm）
8	工字钢	$F=hd+2t(b-d)+0.8584(r^2-r_1^2)$ (mm²) $W=0.00785[hd+2t(b-d)+0.8584(r^2-r_1^2)]$ (kg/m)	h（高度，mm） b（腿宽，mm）； d（腰厚，mm）；
9	槽钢	$F=hd+2t(b-d)+0.4292(r^2-r_1^2)$ (mm²) $W=0.00785[hd+2t(b-d)+0.4292(r^2-r_1^2)]$ (kg/m)	t（平均腿厚，mm）； r（内弧半径，mm）； r_1（端弧半径，mm）
10	钢管	$F=3.1416(D-t)t$ (mm²) $W=0.02466(D-t)t$ (kg/m)	D（外径，mm）； t（壁厚，mm）

注：①W（质量，kg）=F（断面积，mm²）×L（长度，m）×g（密度，g/cm³）×1/1000；

②钢材相对密度一般按 7.85 计算；

③有色材料，如铜材、铝材等亦可按上表计算，计算时的密度可查找有关部分资料。

附录 4　国内外常用工业标准代号表

标准代号	标准名称	
GB	中华人民共和国国家标准	
YB	中华人民共和国	冶金工业部部颁标准
JB		一机部部颁标准
QB		轻工业部部颁标准
HG		化学工业部部颁标准
SY		石油工业部部颁标准
JC		建筑材料工业部部颁标准
JG		建筑工程部部颁标准
EJ		纺织工业部部颁标准
LY		林业部部颁标准
TB		铁道部部颁标准
JT		交通部部颁标准
SD		水利电力部部颁标准
SB		商业部部颁标准
MT		煤炭工业部部颁标准
NJ		农机部部颁标准
KY		中国科学院标准
GC	一机部机床专业标准	
Q/ZB	重型机械行业统一标准	
Q/D	一机部电工专业标准	
沪 Q/YB	上海市冶金工业局标准	
沪 Q/JBD	上海市第一机电工业局标准	
沪 Q/HG	上海市化学工业局标准	

标准代号	标准名称
ASA	美国标准协会标准
ASM	美国金属学会标准
ASTM	美国材料试验协会标准
AISI	美国钢铁学会标准
AA	美国铝公司协会标准
B.S.	英国国家标准
ČSN	捷克斯洛伐克国家标准
CSA	加拿大工业标准
DIN	联邦德国工业标准
FS	美国联邦政府标准
ISA	国际标准协会标准
ISO	国际标准协会建议标准
JIS	日本工业标准
JIC	美国工业联合会标准
MSZ	匈牙利国家标准
NF	法国国家标准
OCT	苏联全苏通用标准
ГОСТ	苏联国家标准
PN	波兰国家标准
SAE	美国汽车工程学会标准
STAS	罗马尼亚国家标准
TGL	德意志民主共和国标准
UNI	意大利工业标准
VDEh	联邦德国钢铁协会标准
국규	朝鲜民主主义人民共和国国家标准

参考文献

〔1〕机械工程手册编辑委员会编，《机械工程手册》第3卷，机械工程材料，机械工业出版社，1983年10月

〔2〕机械工程手册、机电工程手册编辑委员会编，《电机工程手册》，第2卷，电工材料，机械工业出版社，1982年6月

〔3〕机械设计材料手册编写组编，《原子能工业机械设计材料手册》，原子能出版社，1979年10月

〔4〕机械设计手册联合编写组编，《机械设计手册》，化学工业出版社，1979年10月

〔5〕热处理手册编委会编，《热处理手册》，第1分册，机械工业出版社，1984年4月。

〔6〕热处理手册编委会编，《热处理手册》，第4分册，机械工业出版社，1984年4月

〔7〕第一汽车制造厂设备修造分厂编写组编，《机械工程材料手册》，下册，修订第三版，机械工业出版社，1984年6月

〔8〕第一汽车制造厂设备修造分厂编写组编，《机械工程材料手册》，上册，机械工业出版社，1982年8月

〔9〕中华人民共和国船舶检验局编，《钢质海船建造规范》(第3分册)，人民交通出版社，1973年

〔10〕中华人民共和国船舶检验总局编，《钢质海船入级建造规范》，人民交通出版社，1983年1月

〔11〕有色金属及其热处理编写组编著，《有色金属及其热处理》，国防工业出版社，1981年8月

〔12〕冶金部钢铁研究总院　孙珍宝等编著，《合金钢手册》，冶金工业出版社，1984年9月

〔13〕崔崑主编，《钢铁材料及有色金属材料》，机械工业出版社，1981年。

〔14〕彭福泉主编，《金属材料实用手册》，机械工业出版社，1987年10月。

〔15〕孙希太等编，《金属机械性能》，机械工业出版社，1982年10月。

〔16〕宁长盛主编，《船用柴油机设计手册》(第八分册)，国防工业出版社，1979年9月

〔17〕中国五金交电公司编写组编，《实用五金手册》，上海人民出版社，1970年

〔18〕郭鹤桐编，《电镀工艺学》，天津科技出版社，1985年8月

〔19〕简明热处理手册编写组编，《简明热处理手册》，北京出版社，1985年8月

〔20〕刘永铨编，《钢的热处理》，冶金工业出版社，1981年2月

〔21〕雷廷权编，《热处理工艺300种》，农机出版社，1982年3月

〔22〕李云奇编，《真空镀膜技术与设备》，东北工学院出版社，1986年12月

〔23〕李华编，《低温镀铁》，四川人民出版社，1981年2月

〔24〕大连海运学院轮机金属材料编写组编，《轮机金属材料》，人民交通出版社，1983年11月

〔25〕陈大荣编，《船舶柴油机设计》，国防工业出版社，1980年10月

〔26〕美国金属学会主编，《金属手册》第八版第九卷，机械工业出版社，1983年12月

〔27〕黄明志编，《金属力学性能》，交通大学出版社，1986年10月

〔28〕吴连生编，《失效分析技术》，四川科学技术出版社，1985年4月
〔29〕上海交通大学金相分析编写组编，《金相分析》，国防工业出版社，1982年4月
〔30〕陈世朴、王永瑞编，《金属电子显微分析》，机械工业出版社，1982年7月
〔31〕徐灏编，《疲劳强度设计》，机械工业出版社，1981年12月
〔32〕上海交通大学金属断口分析编写组编，《金属断口分析》，国防工业出版社，1979年8月
〔33〕郭大威等编，《滑动轴承的失效分析》，机械工业出版社，1985年8月
〔34〕王仁智编，《疲劳失效分析》，机械工业出版社，1987年10月
〔35〕黄积荣主编，《铸造合金金相图谱》，机械工业出版社，1980年
〔36〕李春志等译，《金相试剂手册》，冶金工业出版社，1973年
〔37〕于柏年等编，《金相图片选集》，中国标准化协会出版，1981年
〔38〕林慧国、周人俊编，《世界钢号手册》（第二版），机械工业出版社，1985年3月
〔39〕安继儒等编，《中外常用金属材料手册》，陕西省标准化情报研究所出版，1984年4月
〔40〕橡胶工业手册编辑组编，《橡胶工业手册》，石油化学工业出版社，1976年
〔41〕塑料应用编写组编，《塑料在造船工业中的应用》，人民交通出版社，1976年。
〔42〕郑明新主编，《工程材料》，清华大学出版社，1983年。
〔43〕〔美〕M.G.方坦纳、N.D.格林著，左景伊译，《腐蚀工程》，化学工业出版社，1982年
〔44〕叶康民编，《金属腐蚀与防护概论》，人民教育出版社，1986年
〔45〕杨文治编，《电化学基础》，北京大学出版社，1983年
〔46〕杨玉崑等编，《合成胶粘剂》，科学出版社，1983年
〔47〕李士学等著，《胶粘剂制备及应用》、科学出版社，1983年
〔48〕林尚安等编，《高分子化学》，科学出版社，1982年
〔49〕工程塑料编写组编，《工程塑料应用》，上海人民教育出版社，1971年
〔50〕日本机械学会编，《机械工学便览》（改订第6版），明善印刷株式会社，1975年
〔51〕金属热处理技术便览编集委员会编，《金属热处理便览》，日刊工业新闻社出版，1980年12月
〔52〕日本金属学会编，《金属データブツケ》，丸善株式会社，1974年7月
〔53〕日本金属学会、日本铁钢协会编，《铁钢材料便览》，丸善株式会社，1972年
〔54〕ASM HANDBOOK COMMITTEE，《Metals Handbook》8th ed, ASE, 1964
〔55〕Ernest w.Tlick, 《Handbook of Adhesive Raw MateriaLs》, Park Ridge, N. J. Noyes, 1982年
〔56〕Williamc. Wake, 《Adhesion and the Formulation of Adhesives》 Second Edction, London, Applielscience, 1982年
〔57〕G. Lubin, 《Handbook of Fiberglass and Advenced Plastics Composition》 VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY-1969.